

Изучение гидродинамических процессов в шельфовой зоне на основе спутниковой информации и данных подспутниковых измерений

О.Ю. Лаврова, М.И. Митягина, К.Д. Сабинин, А.Н. Серебряный

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

В статье приводится обзор проведенных в отделе Исследование Земли из космоса Института космических исследований РАН работ, посвященных изучению гидродинамических процессов на шельфе на основе данных дистанционного зондирования Земли и результатов подспутниковых измерений. Основное внимание уделялось таким процессам и явлениям как субмезомасштабные вихри и вихревые структуры, внутренние волны, течения в проливах. Экспериментальную основу исследования составили данные спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой, а также данные видимого и ИК-диапазонов оптических сенсоров спутникового базирования. Для адекватной интерпретации спутниковых данных регулярно проводились подспутниковые измерения параметров течений в северо-восточной части Черного моря и вблизи полуострова Крым. Приводятся результаты совместного анализа данных дистанционных и контактных измерений параметров субмезомасштабных вихрей и внутренних волн в прибрежной зоне.

На основе спутниковых данных высокого пространственного разрешения определены районы пространственной локализации внутренних волн в Черном, Каспийском и Балтийском морях. Показано, что для морей без приливов основными источниками генерации внутренних волн служат локальные фронты сгонно-нагонного происхождения, выходы на шельф внутренних сейш и квазиинерционных внутренних волн, гидрологические фронты, связанные с интрузией речных вод.

Приводятся результаты определения скорости и направления течений в Беринговом проливе на основе данных спутниковой радиолокации.

Обсуждаются примеры проявлений на спутниковых изображениях гидродинамических процессов, специфическая форма которых пока не всегда находит объяснение в рамках сложившихся представлений. Для отдельных случаев представлены феноменологические модели, объясняющие вероятную причину их образования.

Ключевые слова: спутниковые радиолокационные изображения, спутниковый мониторинг, морская поверхность, субмезомасштабные вихри, внутренние волны, течения в проливах, Черное море, Каспийское море, Балтийское море, Берингов пролив

Введение

Разработка методов спутникового зондирования суши и Мирового океана и их применения как для фундаментальных исследований, так и для решения широкого круга прикладных задач является одним из важнейших направлений, успешно развивающихся в ИКИ РАН. В 1974 г. эти работы возглавил профессор Валентин Семёнович Эткин, один из пионеров исследования Мирового океана микроволновыми методами (Раев, Шарков, 2015). Его усилия во многом предопределили тот высокий уровень дистанционных исследований океана, который достигнут в нашей стране. Лаборатория Аэрокосмической радиолокации отдела Исследование Земли из космоса ИКИ РАН была образована в 2002 г. и продолжает развитие научного направления, начало которого было положено д.ф. м.н., профессором В.С. Эткиным (Булатов и др., 2003). За годы существования лаборатории в ходе выполнения целого ряда российских и международных проектов накоплен уникальный опыт работы с разнообразной спутниковой информацией о состоянии морей и океанов и развит комплексный (многосенсорный и междисциплинарный) подход к исследованию Мирового океана на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса. (Лаврова и др., 2011а).

Метод спутникового радиолокационного зондирования поверхности океана является в настоящее время одним из основных методов решения задач изучения процессов, происходящих в океане и атмосфере над ним. Использование радиолокационных данных открывает широкие возможности систематического получения необходимой информации с высоким пространственным разрешением в широкой полосе обзора, в масштабе времени, близком к реальному, практически при любых погодных условиях, независимо от времени суток. Изображения морской поверхности, полученные при помощи спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой, составляют основу исследований, а для их уверенной и надежной интерпретации в Лаборатории разрабатываются методики анализа всей совокупности информации, полученной с помощью приборов дистанционной диагностики, установленных на различных спутниках, специализированных на дистанционном зондировании Земли.

Одно из важнейших направлений исследований – изучение на основе спутниковых данных гидродинамических процессов на морском шельфе. Основное внимание уделяется таким процессам, как внутренние волны и субмезомасштабные вихри, а также структура течений в проливах.

Субмезомасштабные вихри

Спутниковые наблюдения субмезомасштабных вихревых структур

Несмотря на усиленное внимание к исследованию вихревых процессов в океане, наиболее изученными и описанными до сих пор остаются мезомасштабные вихри с размерами 30–100 км. Влияние огромного числа факторов и разнообразие условий в реальном океане определяют неизбежную фрагментарность сведений о процессах формирования, развития и распространения вихрей малых масштабов (меньше бароклинного радиуса деформации Россби Rd) или, согласно современной терминологии, субмезомасштабных вихрей. Вихри малых масштабов достаточно сложны для исследования традиционными методами в силу их малых размеров, нестационарности, спонтанности появления и малого времени жизни. Обладая размерами от сотен метров до десятка километров, они не всегда проявляются на спутниковых изображениях видимого и инфракрасного (ИК) диапазона, имеющих стандартное разрешение 250–1000 м, вследствие отсутствия тепловых или оптических контрастов, а также недостаточного пространственного разрешения. Только в последние годы, в связи с относительной доступностью спутниковых данных высокого пространственного разрешения, открываются новые возможности более детального изучения субмезомасштабных гидродинамических процессов, в том числе вихревых структур. Под вихрями мы понимаем видимые на радиолокационных изображениях (или на изображениях, полученных в видимом диапазоне в зоне солнечного блика) структуры, образованные тонкими закручивающимися спиральными темными

или, наоборот, яркими светлыми полосами на морской поверхности. Первые фотографии таких вихрей в зоне солнечного блика были сделаны еще в ходе космической программы «Аполлон» (Scully-Power, 1986; Munk et al., 2000). Подобные вихревые структуры отчетливой спиралевидной формы получили название «спиральные вихри». Следует отметить, однако, что спиральная структура присуща большинству океанических вихрей, в связи с чем этот термин не совсем удачен для описания вихрей конкретных масштабов.

В результате многочисленных исследований было установлено, что вихри малых масштабов наблюдаются в различных районах Мирового океана как в прибрежной зоне, так и в открытом море. Как правило, они проявляются в виде хаотично ориентированных и плотно упакованных вихревых кластеров, но могут представлять и одиночные вихри, а также достаточно упорядоченные цепочки таких вихрей (Eldevik, Dysthe, 2002; Ivanov, Ginzburg, 2002; Митягина, Лаврова, 2009; Лаврова и др., 2011а). Получен ряд свидетельств наличия вращения в этих структурах, одним из которых является искривление при пересечении таких вихрей первоначально прямолинейного корабельного следа (Munk et al., 2000; Lavrova, Sabinin 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, постоянно присутствующих на морской поверхности, особенно в теплое время года. Пленки обладают способностью избирательного гашения гравитационно-капиллярной составляющей поверхностного волнения в силу неравномерного распределения поверхностного натяжения в местах их скопления и тем самым уменьшают величину обратно рассеянного сигнала. Вовлекаясь в орбитальные движения, пленки ПАВ как бы «прорисовывают» вихри на РЛИ преимущественно в условиях слабого и умеренного приповерхностного ветра. Выглаживая морскую поверхность, они образуют так называемые слики. Ширина полос примерно всегда одинакова и составляет 100–300 м, а расстояние между ними варьируется в зависимости от диаметра вихря (*рис. 1а*). Лучшее всего так называемый «сликовый механизм» проявления вихрей на РЛИ работает при скоростях ветра 3–5 м/с, при которых короткие гравитационно-капиллярные волны, вызывающие брэгговское рассеяние радиолокационного сигнала, уже существуют, а ветер еще не оказывает разрушительного воздействия на поверхностные пленки. На долю вихрей, проявляющихся за счет пленочного механизма, приходится до 90 % всех выявленных субмезомасштабных вихрей. Проведенный нами многолетний спутниковый мониторинг позволил выявить основные районы наиболее частых проявлений мелкомасштабных вихрей и вихревых диполей в Черном, Балтийском и Каспийском морях. Как правило, это прибрежная полоса и районы выноса рек, что связано с повышенной концентрацией поверхностно-активных веществ в воде. Во время активного цветения водорослей мелкомасштабные вихри и вихревые диполи за счет сликового механизма могут проявляться в самых разных частях. На *рис. 1 б, в* представлены примеры проявлений на РЛИ мелкомасштабных вихрей за счет «сликово-

го» механизма в разных морях. Как видно из представленных рисунков, радиолокационные образы мелкомасштабных вихрей схожи и в летний период все они располагались в районах повышенной концентрации ПАВ, связанных с активным цветением водорослей, что подтверждают карты поля концентрации хлорофилла-а, восстановленные по данным MODIS Aqua.

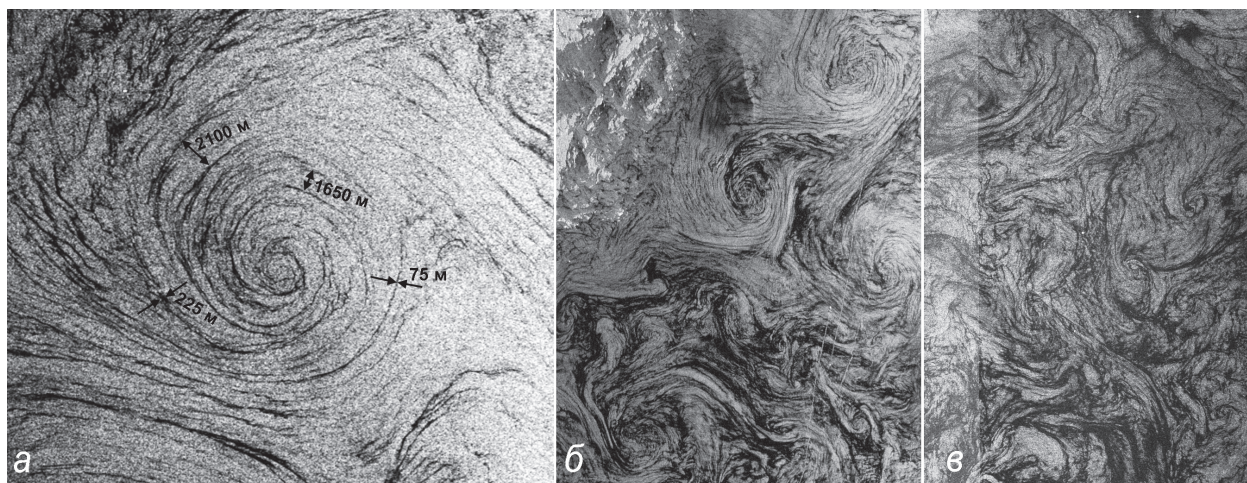


Рис. 1. Проявление субмезомасштабных вихревых структур на спутниковых радиолокационных изображениях: а) характерные пространственные размеры сликов, «прорисовывающих» циклонический вихрь. Фрагмент ASAR Envisat изображения от 10.05.2007; б) фрагмент SAR ERS-2 изображения от 21.06.2009, полученного в районе северо-западной о. Готланд, Балтийское море; в) фрагмент ASAR Envisat изображения от 17.06.2011, полученного в районе дельты Дуная, Черное море

Второй механизм, благодаря которому вихри проявляются на РЛИ, связан с взаимодействием волн и течений в области циклонического сдвига течения (в дальнейшем для краткости сдвигово-волновой механизм) и проявляется в виде закрученных в спирали или дуги областей повышенного рассеяния сигнала. Как правило, это единственная возможность наблюдать вихри при сильных ветрах, когда пленки ПАВ разрушаются, или зимой, когда концентрация ПАВ мала. Такой механизм проявлений мелкомасштабных вихрей не дает возможность изучать их тонкую пространственную структуру, области повышенной яркости, связанные с дивергентными зонами, «прорисовывают» обычно только внешний контур вихря или вихревого диполя.

Третий механизм визуализации вихревых структур на РЛИ за счет льда подобен проявлению вихрей на оптических изображениях. Он аналогичен пленочному механизму, только пассивными трассерами выступает молодой, еще не сплоченный, подвижный лед. Интересно отметить, такой механизм позволяет выявить районы, где субмезомасштабные вихри наблюдаются только в зимний период. Один из таких районов – северная часть Финского залива. На *рис. 2* представлен пример «ледяных» вихрей в Датских проливах.

На основе спутниковых данных высокого пространственного разрешения были выявлены основные механизмы генерации вихревых структур разных масштабов и определены районы их пространственной локализации в Черном, Каспийском и Балтийском морях.

(Лаврова, 2005; Lavrova et al., 2008; Mityagina et al., 2010; Костяной и др., 2010; Лаврова и др., 2011a; Каримова, 2012) В наших работах и работах наших коллег из Института океанологии РАН им. П.П. Ширшова было показано, что основными механизмами образования субмезомасштабных вихрей являются: ветровой импульс, неоднородности атмосферного потока, сдвиговая неустойчивость течений, речной сток, взаимодействие вихрей и их диссипация, взаимодействие течений с мелкомасштабными особенностями береговой линии (обтекание мысов и бухт) (Гинзбург, Федоров, 1984; Зацепин и др., 2011; Костяной и др., 2010; Лаврова и др., 2011a; Lavrova et al., 2015). Это характерно в первую очередь для северо-восточной части Черного моря и юго-восточной части Балтийского моря.

Несмотря на большой научный интерес к данному гидродинамическому процессу и большое количество теоретических и экспериментальных работ, появившихся в последнее время, открытыми остаются многие вопросы, в частности касающиеся глубины проникновения субмезомасштабных вихревых структур в толщу воды, изменчивости с глубиной, продолжительности их существования.

Подспутниковые измерения параметров субмезомасштабных вихрей

С целью верификации результатов, полученных на основе спутниковой информации, нами регулярно проводятся подспутниковые измерения тонкой структуры реальных полей течений в северо-восточной части Черного моря в районе г. Геленджика и в юго-восточной части Балтийского моря вдоль Самбийского полуострова (Серебряный, Лаврова, 2008; Lavrova et al., 2012, 2013; Dreschler-Fischer et al., 2014; Лаврова и др., 2013, 2014).

Подспутниковые измерения параметров прибрежных течений в северо-восточной части Черного моря проводятся нами ежегодно, начиная с 2004 г. в летний (июнь) и осенний периоды (сентябрь – октябрь). Измерения осуществляются с борта маломерного судна с помощью акустического доплеровского профилографа течений (ADCP), CTD зонда и автономной буйковой станции гирлянды термисторов. На период проведения натурных измерений заказывалась радиолокационная съемка района эксперимента с высоким пространственным разрешением при помощи радиолокаторов с синтезированной апертурой спутников ERS-2, Envisat, TerraSAR-X, TanDEM-X и RADARSAT-2.

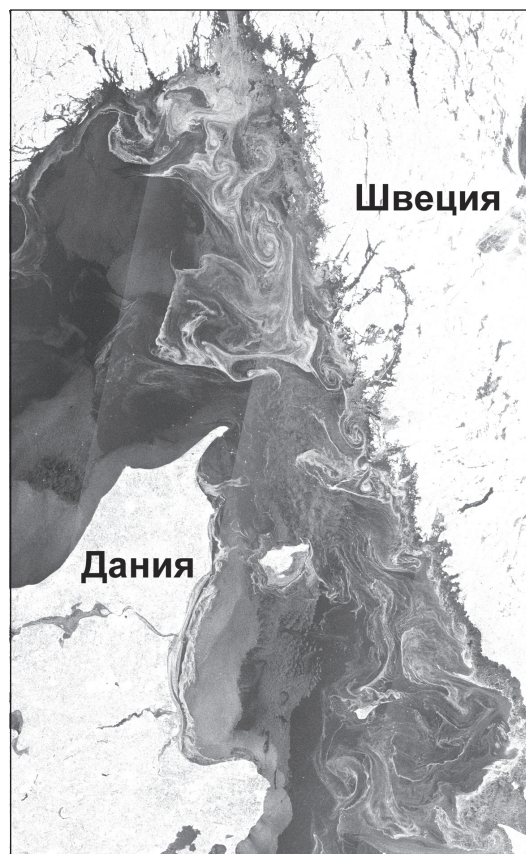


Рис. 2. Проявление на РЛИ вихревых структур за счет «ледового» механизма. Фрагмент ASAR Envisat изображения от 26.01.2010, полученного над акваторией пролива Скагеррак

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.

Результаты многолетних измерений параметров течений в районе Голубая – Геленджикская бухты кратко можно сформулировать следующим образом. Прибрежные течения в этом районе чрезвычайно изменчивы. Их направление и скорость могут существенно меняться даже в течение суток. Регулярно фиксируются противотечения (распространяющиеся на юго-восток, в направлении противоположном Основному черноморскому течению), связанные, на наш взгляд, с прохождением мелкомасштабных антициклонических вихрей. Диаметр таких вихрей составляет 7–12 км. Продолжительность «жизни» субмезомасштабных прибрежных вихрей составляет не более 2–3 суток. Максимальный срок прохождения антициклонического вихря в районе экспериментальных работ, который был выявлен в октябре 2006 г., составил 5 суток (Серебряный, Лаврова, 2008).

Скорость осредненного потока спадает от периферии вихря к его центру. По данным ADCP, на записи параметров скорости и направления среднего по глубине течения на разрезе существует точка, в которой скорость течения обращается в нуль, а направление меняется на противоположное (*рис. 3а*). Характер изменения скорости и направления течения с глубиной можно хорошо проследить при анализе данных «Интенсивность скорости» (Velocity Magnitude) (*рис. 3б*) и «Направление скорости» (Velocity Direction) (*рис. 3в*). Например, для случая, представленного на *рис. 3* (измерения проводились 17 сентября 2012 г.), интенсивность течения практически не менялась с глубиной (по крайней мере, до глубины 20 м). Направление течения же являлось постоянным с глубиной только на внешней стороне вихря. В приповерхностном слое течение по мере удаления от берега плавно менялось с юго-восточного на южное, а потом на западное и северо-западное.

На расстоянии 1,5 км от берега, где глубина составляла 37 м, течение меняло свое направление с глубиной и имело положительную циклоническую направленность: с юго-восточного через восточное, северное и далее к внешнему краю вихря оно по всей глубине стало северо-западным. 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). Таким образом, измерения показывают, что течение в вихре существенно неоднородно по глубине. В последние два года

в ходе подспутниковых экспериментов стали использоваться дрейфующие буи, которые располагаются на разных глубинах. Совместное использование данных ADCP и набора таких буев позволит более детально изучать характер прибрежных течений на разных глубинах.

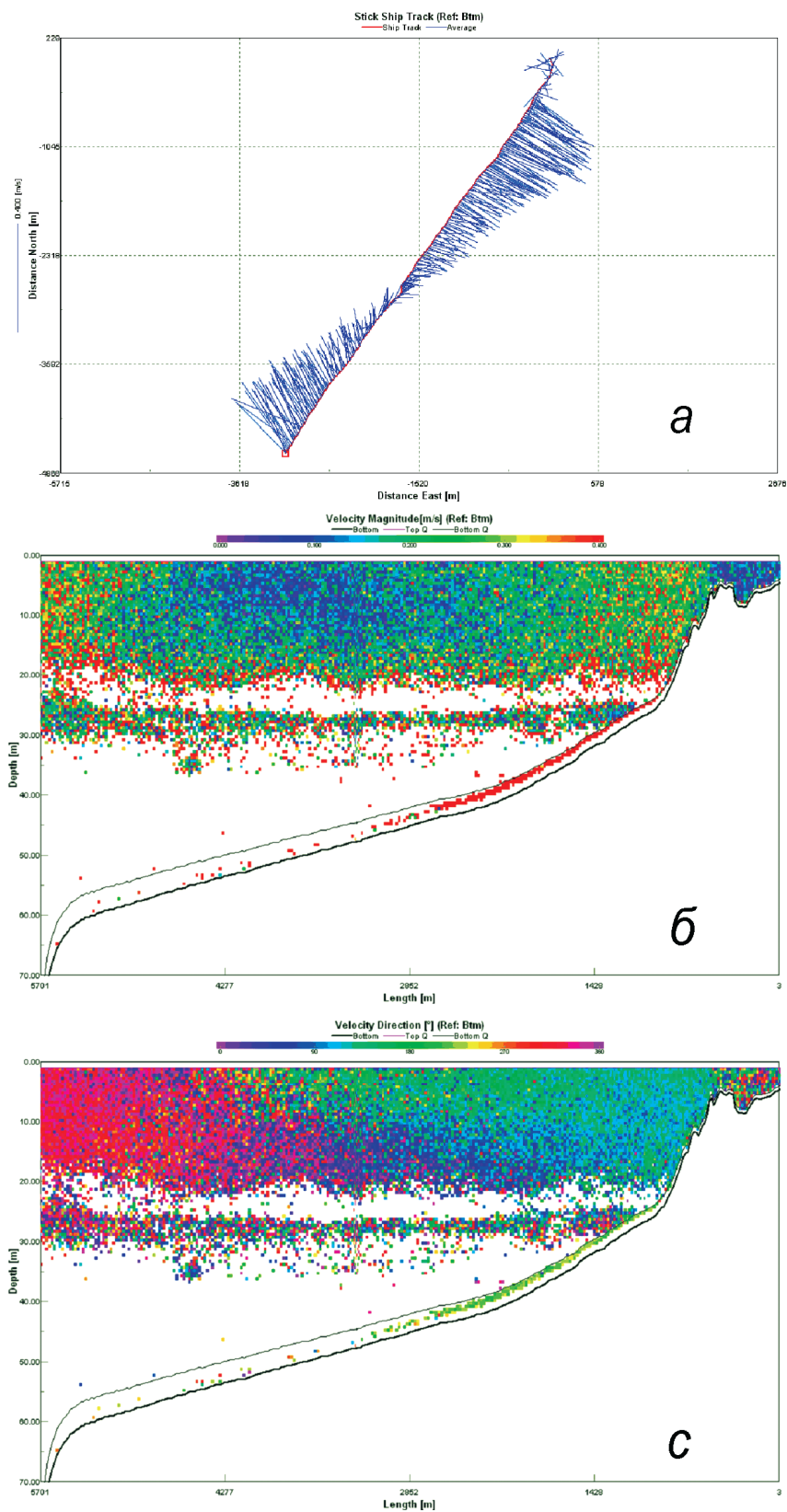


Рис. 3. Результаты измерения параметров антициклонического вихря с помощью ADCP 17.09.2012:
 а) средние скорость и направление течения на разрезе; б) распределение интенсивности течения с глубиной; в) распределение направления течения с глубиной

Изменение положения термоклина при прохождении субмезомасштабных вихрей в прибрежной зоне хорошо прослеживается в данных объемного обратного рассеяния акустического сигнала, получаемых с помощью ADCP. Как показали наши измерения, при прохождении антициклонического вихря, например, термоклин приподнимается в среднем на 3 м по сравнению с положением до появления вихря (Серебряный, Лаврова, 2008).

Один из важнейших вопросов, который пока так до конца не решен – это установление связи между положением сликовых полос, детектируемых на РЛИ с выявленными на записях ADCP проявлениями противотечений и вихревых структур. В отдельных случаях по данным ADCP были зафиксированы случаи появления струй интенсивного течения, выходящих из глубины к поверхности. Струи разделены областью слабого течения размером около 1500 м. Выходя на поверхность, они образуют сдвиговые течения, которые на морской поверхности могут приводить к образованию сликов, подавляя поверхностное волнение в см-диапазоне. Возможно, это и способствует образованию спиралевидных структур на поверхности моря, которые проявляются на спутниковых изображениях. В то же время, совместный анализ радиолокационных изображений и данных синхронных измерений с помощью ADCP показал, что практически всегда на границе двух противоположенных течений, т.е. в области смены направления течений, вызванной прохождением антициклонического вихря, образуется сликовая полоса (*рис. 12*), которая хорошо видна, как на РЛИ, так и при визуальных наблюдениях с борта судна (Лаврова и др., 2013). Вдоль нее, как правило, концентрируется грязь, пена, мусор.

Внутренние волны

Внутренние волны 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 водоёмов. 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; Лаврова и др., 2011а). Формирующиеся в зонах расхождения орбитальных течений (зонах дивергенции) полосы выглаженной ряби (слики), как и полосы повышенной интенсивности ряби (сулои), возникающие в местах схождения течений (зонах конвергенции), очерчивают пространственную структуру внутренних волн и движутся вместе с ними.

Причины возникновения внутренних волн разнообразны: они могут быть вызваны приливами и инерционными движениями, колебаниями атмосферного давления, ветра, подводными землетрясениями, обтеканием течения неровностей дна, антропогенными воздействиями и т.п. (Коняев, Сабинин, 1992). В прибрежных акваториях океанов и приливных морей преобладают внутренние волны, возникающие при взаимодействии

приливных течений с краем шельфа. Эти волны изучались в ходе многих натуральных, лабораторных и численных экспериментов, а их география неплохо отражена в Атласе внутренних волн (Jackson, Apel, 2002), в котором обобщены данные многочисленных наблюдений внутренних волн в Мировом океане. В то же время сведения о поверхностных проявлениях внутренних волн в бесприливных морях, таких, например, как Черное, Балтийское и Каспийское, практически отсутствуют, за исключением тех, которые описаны в наших работах.

Использование данных спутникового дистанционного зондирования морской поверхности существенно расширило наше представление о таком важном явлении, как внутренние волны в океане. В последнее время удалось выявить поверхностные проявления внутренних волн не только в хорошо изученных и подробно описанных в научной литературе районах Мирового океана, но и в замкнутых бассейнах – морях и больших озерах. Наблюдаемые внутренние волны в бесприливных бассейнах существенно менее интенсивны, чем их аналоги в океане или в морях с приливами, однако более разнообразны с точки зрения механизмов своего происхождения.

Начиная с 70-х гг. прошлого века в шельфовых зонах Каспийского и Черного морей проводились длительные и детальные исследования внутренних волн контактными методами (Коняев, 1975; Иванов и др., 1981; Иванов, Серебряный, 1982, 1983, 1985), в частности с применением пространственных антенн распределенных датчиков температуры (Коняев, Сабинин, 1973), которые позволили не только подробно исследовать пространственно-временные характеристики волн, но также выявить и описать процессы, ответственные за генерацию цугов интенсивных внутренних волн. Главной особенностью поля внутренних волн в бесприливном море является относительно невысокий уровень амплитуд внутренних волн по сравнению со своими аналогами в океане. Другая выявленная особенность – широкое распространение эффектов нелинейности во внутренних волнах на шельфе бесприливного моря, аналогично тому, как это имеет место в море с приливами (Серебряный, 1990, 1993). Эффекты нелинейности (вертикальная и горизонтальная асимметрия профилей волн), а также «солитоноподобность» волн проявляются в интенсивных волнах, входящих в цуги, генерируемые при определенных обстоятельствах.

Такие обстоятельства представляют собой совокупность процессов, ответственных за генерацию интенсивных внутренних волн в бесприливном море. Эти процессы были выявлены путем длительных наблюдений, проведенных со стационарных платформ в Каспийском и Черном морях. Эффективным механизмом генерации цугов интенсивных внутренних волн в бесприливном море служат выходы на шельф длинных внутренних волн – внутренних сейш и квазиинерционных внутренних волн (Иванов и др., 1981; Иванов, Серебряный, 1985), появляющихся, как правило, в послештормовую погоду. Выходящие на шельф длинные внутренние волны в бесприливном море играют ту же роль, что и внутренние приливы на шельфе океана. По мере распространения к берегу, они сначала претерпевают нелинейную эволюцию, превращаясь из квазисинусоидальных в нелинейные волны, а затем генерируют пакеты солитоноподобных внутренних волн. В условиях узкого приглубого шельфа

генерация волн максимальных амплитуд связана с подходом в прибрежную зону локальных фронтов сгонно-нагонного происхождения, наблюдающихся в периоды снятия ветрового напряжения и восстановления нарушенной сгоном или нагоном стратификации (Иванов, Серебряный, 1985; Власенко и др., 1997). В условиях широкого шельфа возможна генерация интенсивных внутренних волн движущейся поверхностной интрузией распресненных прибрежных вод (Иванов, Серебряный, 1983; Kao et al., 1978).

Регулярный спутниковый мониторинг морской поверхности, проводящийся сотрудниками Лаборатории аэрокосмической радиолокации ИКИ РАН с 2005 в северо-восточной части Черного моря и с 2009 г. на всей акватории Черного, Балтийского и Каспийского морей, позволил не только обнаружить поверхностные проявления внутренних волн на радиолокационных и оптических изображениях в этих бесприливных морях, но и восстановить картину их пространственной и временной изменчивости. Кроме того, комплексное использование данных, различных по своей физической природе (активное и пассивное микроволновое зондирование, оптические и ИК данные), пространственному разрешению и ширине полосы съемки дало уникальную возможность восстановить целостную картину метеорологических и гидродинамических явлений и процессов в районах интереса. На основе анализа всей совокупности параметров, полученных из данных дистанционного зондирования, определены возможные факторы, приводящие к генерации наблюдаемых внутренних волн неприливногo происхождения, и сделаны предположения о соответствующих механизмах генерации. (Лаврова и др., 2009, 2011а,б,в; Mityagina et al., 2010; Lavrova et al., 2014)

В результате проведения многолетних спутниковых наблюдений было выявлено, что поверхностные проявления ВВ в различных морях существенно различаются по своим пространственным характеристикам. Однако удалось установить общий для всех районов наблюдения факт: максимальная встречаемость поверхностных проявлений внутренних волн (ППВВ) соответствует наличию резкого и неглубокого пикноклина (Лаврова и др. 2009; Митягина, Лаврова, 2010). Такие условия благоприятствуют как зарождению внутренних солитонов, так и выраженному проявлению их на морской поверхности, поскольку способствуют развитию сильных орбитальных течений в приповерхностном слое, что приводит к модуляции спектра ветрового волнения и проявлению внутренних волн в РЛИ морской поверхности. Рассмотрим основные результаты наблюдений ВВ в Черном, Каспийском и Балтийском морях.

Внутренние волны в Черном море

На основе анализа большого количества спутниковых изображений, полученных над акваторией Черного моря в микроволновом и видимом диапазонах, были определены три основных района, в которых наиболее часто наблюдаются поверхностные проявления внутренних волн: западная часть Черного моря вблизи дельты Дуная, акватория, прилегающая к Крымскому полуострову, северо-восточная часть моря (рис. 4).



Рис. 4. Районы Черного моря, где регулярно наблюдаются на спутниковых изображениях поверхностные проявления внутренних волн: 1 – дунайский шельф; 2 – акватория у берегов полуострова Крым; 3 – северо-восточная часть моря

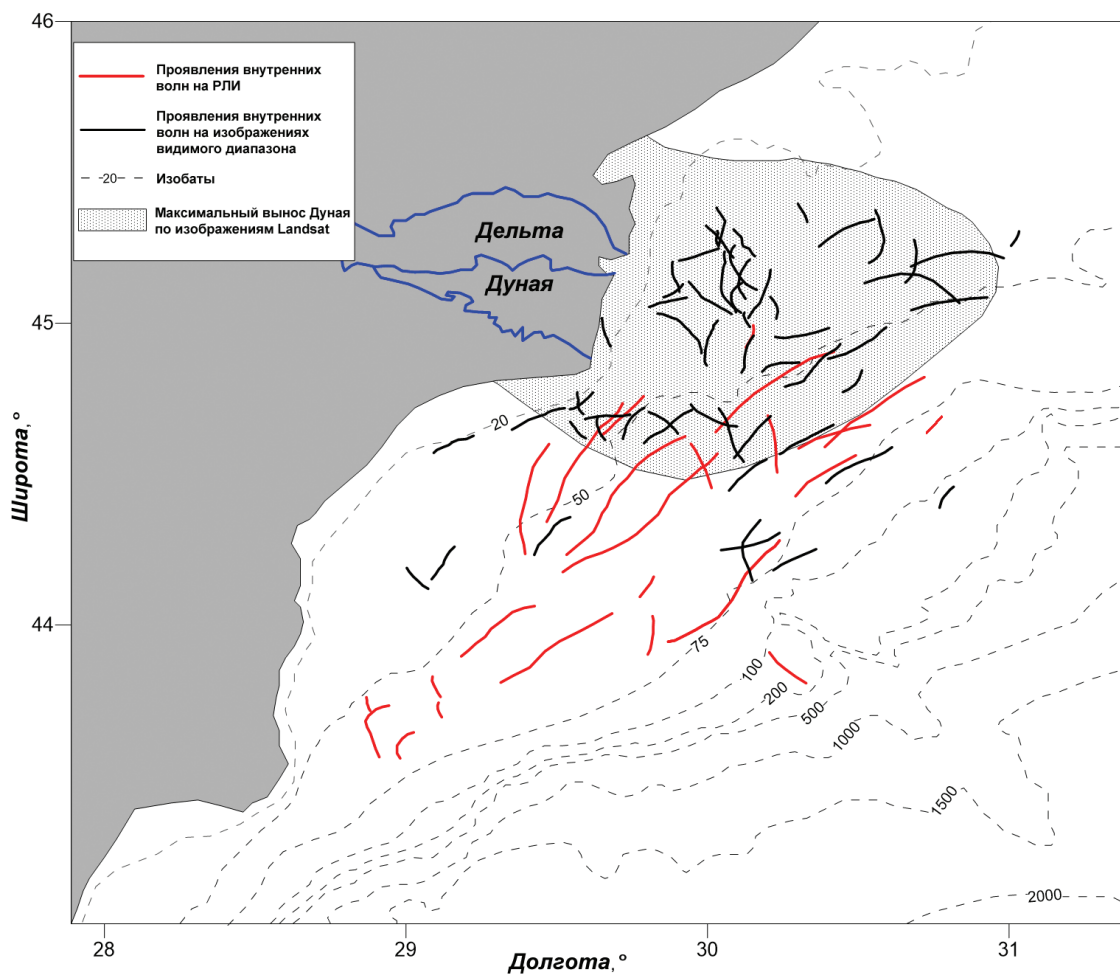


Рис. 5. Расположение передних фронтов пакетов внутренних волн на карте западной части Черного моря, выявленных на спутниковых изображениях 2010 г.

Наибольшее количество ППВВ регистрируется на румынском шельфе **в районе дельты Дуная**. Причем на одном спутниковом изображении высокого пространственно разрешения могут наблюдаться до 20 пакетов внутренних волн. На *рис. 5* представлена карта данного района с нанесенными на нее передними фронтами пакетов внутренних волн, выявленных на радиолокационных изображениях ASAR Envisat, SAR ERS-2 и в данном видимом диапазоне TM Landsat-5 и ETM+ Landsat-7. На карте представлены данные только за 2010 г. Практически все проявления ВВ наблюдались в период с начала мая по конец июля. Аналогичная картина была и в другие годы.

Характер ориентаций волновых фронтов позволяет выделить два основных ареала, к которым принадлежат наблюдаемые ППВВ: зона влияния дунайских вод (заштрихованная область) и область над изобатами 50–75 м. Пакеты внутренних волн из первой группы распространяются в самых разных направлениях, они содержат от 10 до 20 волн, длина которых не превосходит 150 м, а фронт ведущей волны существенно искривлен. Источником генерации ВВ из первой группы является фронт, образованный интенсивным выносом распресненных вод из Дуная. Многие цуги ВВ располагаются прямо на границе переднего фронта мутных вод и распространяются вместе с этим фронтом. Пакеты внутренних волн наблюдаются в данном районе регулярно, не только в летний период, когда существует ярко выраженный сезонный термоклин, но и в зимний период (январе и феврале). Генерация ВВ фронтом, связанным с выносом речных вод, достаточно распространенное явление. Теория этого явления описана, например, в работах (Nash, Moum, 2005; Stashchuk, Vlasenko 2009), а спутниковые наблюдения анализируются в работе (Pan et al., 2007). Воды р. Дунай поступают в поверхностные слои Чёрного моря через множество рукавов. Основной сток происходит по 3 главным водным артериям: Килийскому, Сулинскому и Георгиевскому гирлам. Воды каждого из рукавов несколько различаются по своим характеристикам. При их взаимодействии между собой и с солеными черноморскими водами образуется много относительно мелкомасштабных нестационарных фронтов, которые, по всей видимости, излучают пакеты ВВ разного направления. В зоне выноса дунайских вод на цветосинтезированных изображениях видимого диапазона хорошо видно, что в подавляющем большинстве случаев пакеты внутренних волн параллельны фронтам, связанным с распространением дунайских вод различной мутности (*рис. 6а*).

Во втором ареале (область более мористых вод) пакеты внутренних волн, видимые на спутниковых изображениях, практически всегда распространяются к берегу, а их фронты параллельны изобатам. Количество волн в пакете обычно не превосходит 10, длина волн достигает 300 м. Они образуются, по нашему мнению, под воздействием выходящих на шельф внутренними волнами инерционного периода, как это происходит в открытом океане под воздействием, главным образом, приливов (Коняев, Сабинин, 1992). Данный механизм генерации интенсивных солитоноподобных внутренних волн наблюдался на Черном море также и у южного берега Крыма (Иванов, Серебряный, 1985). Пример волн, выявленных на радиолокационном изображении во втором ареале, представлен на *рис. 6б*.

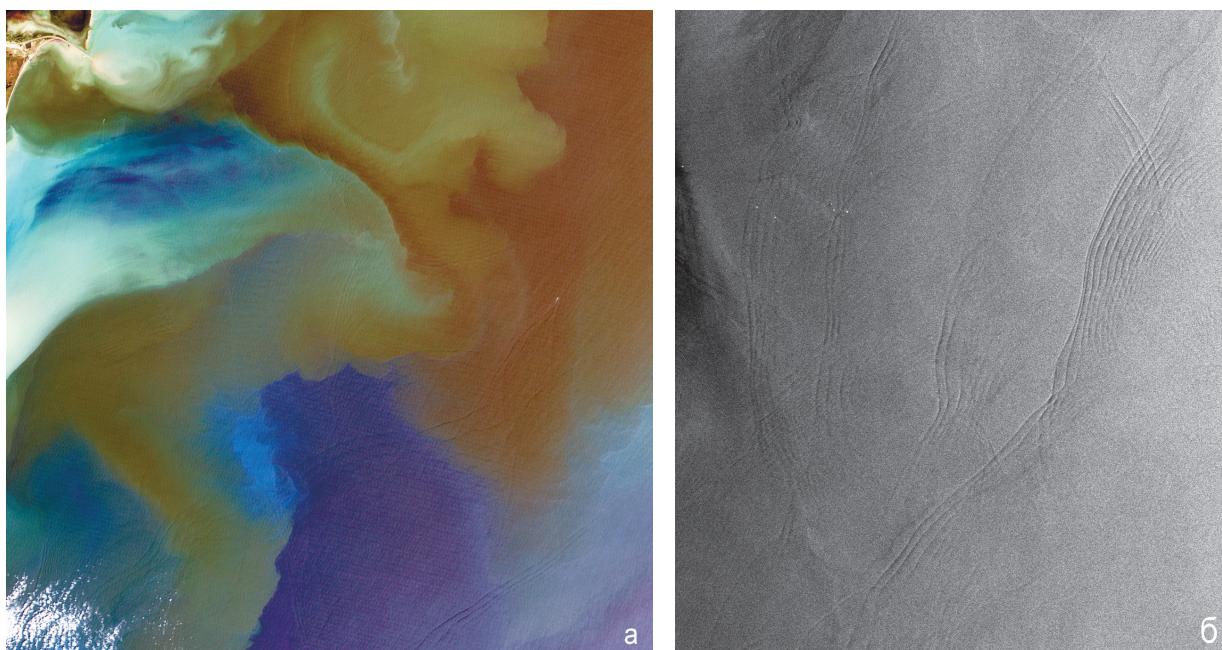


Рис. 6. а) Поверхностные проявления многочисленных пакетов внутренних волн вблизи дельты Дуная. Фрагмент цветосинтезированного изображения ТМ Landsat-5, полученного 04 июня 2010 г. б) Поверхностные проявления цугов внутренних волн на дунайском шельфе, распространяющихся в сторону берега. Фрагмент ASAR Envisat изображения, полученного 08 июня 2010 г.

Интересно отметить, что внутренние волны, связанные с фронтами выноса дунайских вод, были выявлены нами в основном на изображениях видимого диапазона сенсоров спутника Landsat. На радиолокационных изображениях среднего пространственного разрешения они не выявляются. Это связано, прежде всего, с высоким разрешением оптических изображений (30 м) и их более высокими контрастами по сравнению с радиолокационными данными. К сожалению, мы не располагали радиолокационными данными высокого разрешения для этого района. Распространяющиеся к берегу ВВ хорошо детектируются как на радиолокационных, так и на оптических снимках.

Внутренние волны в районе **Крымского полуострова** тщательно исследованы и подробно описаны в работах ученых Морского гидрофизического института (Севастополь) и Акустического института им. Андреева (Москва). Их изучению способствовали регулярные наблюдения с морской гидрофизической платформы в Качивели (Большая Ялта), которые продолжаются уже в течение 25 лет. Результаты последних измерений представлены ниже.

Спутниковые наблюдения в данном районе проводятся нами, начиная с 2009 г. До 8 апреля 2012 г. они осуществлялись преимущественно с помощью данных ASAR Envisat, после окончания его работы на орбите наши исследования характеристик внутренних волн в районе полуострова Крым базируются на данных Landsat и Sentinel-1. На радиолокационных изображениях за период 2009–2011 г. было выявлено только 8 случаев поверхностных проявлений ВВ, причем не только в июне – августе, но и в октябре (01.10.2010). Спутниковые наблюдения, проводимые нами в данном районе, показали, что ППВВ наиболее часто обнаруживаются в двух районах – у южного и у западного берега Крыма. Один из характерных примеров проявлений ВВ у западного берега Крыма представлен на *рис. 7*.



*Рис. 7. Проявление цуга внутренних волн у западного побережья Крыма (отмечен стрелкой).
Фрагмент ASAR Envisat изображения от 07.08.2009*

Все пакеты обнаруженных нами внутренних волн у побережья Крыма распространялись к берегу. Достаточно часто фронты в цуге представляют собой концентрические дуги, что позволяет с определенной точностью выявить район генерации данного цуга. В районе кромки шельфа у южного берега Крыма скорость струи Основного черноморского течения, главного элемента циркуляции Черного моря, может достигать 1 м/с и более. Наличие меандров и инерционных колебаний приводит к тому,

что здесь может существовать нормальная к берегу компонента скорости течения с амплитудой до 50 см/с, что сопоставимо со скоростями приливных течений в приливных морях. Для Черного моря распространенным механизмом является генерация пакетов внутренних волн проходящими локальными фронтами сгонно-нагонного происхождения, которые у южного берега Крыма выражены наиболее сильно.

Хотелось бы отметить, что на спутниковых изображениях высокого пространственного разрешения, например данных в панхроматическом 8-м канале сенсора OLI Landsat-8, пространственное разрешение которого составляет 15 м, или на РЛИ Radarsat-2, разрешение которого от 3 м, хорошо видны внутренние волны, вызванные движущимся судном. ВВ естественного происхождения и корабельные ВВ в данном районе имеют близкие длины волн – порядка 80–100 м. Естественно, они имеют различия в протяженности фронтов, что можно определить только на спутниковых изображениях. Протяженность фронтов ВВ естественного происхождения редко превосходит 5–6 км, а корабельные следы, содержащие ВВ, могут растягиваться на десятки километров. На фрагменте изображения OLI Landsat-8 от 01.08.2013 проявляются ВВ обоих этих типов (рис. 8). При проведении натурных экспериментов у берегов Крыма необходимо учитывать возможность прохождения ВВ как естественного, так и корабельного происхождения.

Факт регистрации ППВВ на радиолокационных изображениях среднего разрешения в **северо-восточной части Черного моря** достаточно редкое событие. В период наших наблюдений в 2005–2013 гг. было зарегистрировано только 12 случаев. Карта пространственного распределения ППВВ, выявленных в северо-восточной части Черного моря представлена на рис. 9. Пакеты ВВ встречались как над изобатами 40–50 м; так и над достаточно большими глубинами – 1800–2000 м. Чаще всего ППВВ в этом районе наблюдались в период с начала июня до середины июля, хотя контактными методами они определяются достаточно часто, и не только в летний период (Lavrova et al., 2013, Лаврова и др., 2013).

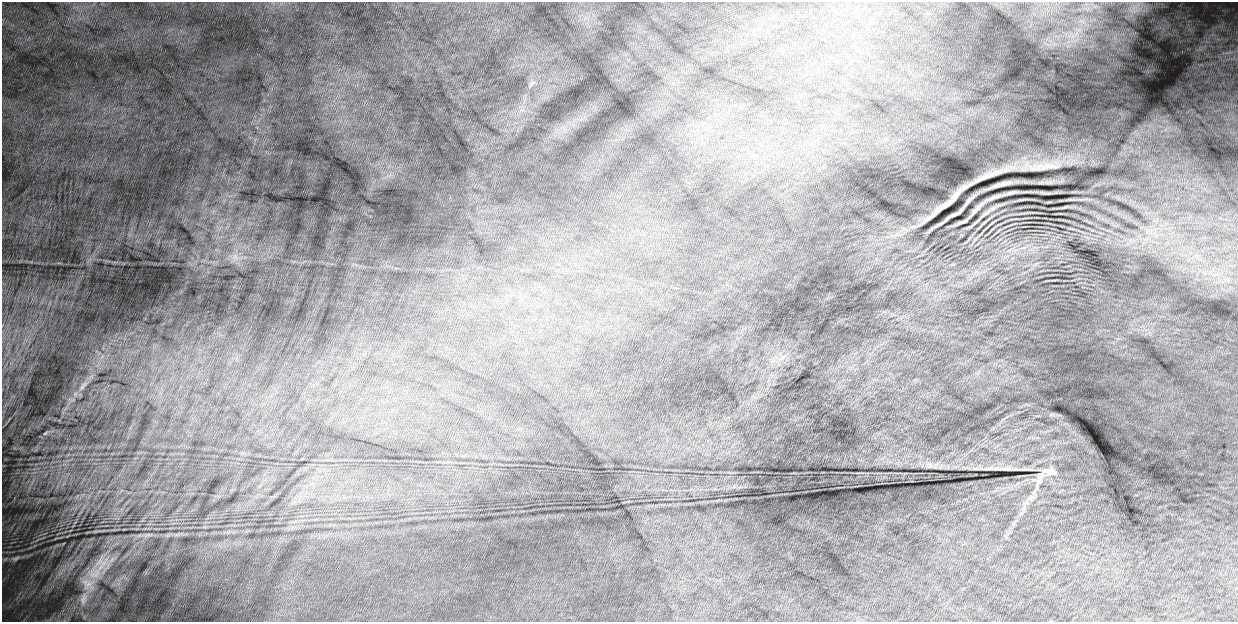


Рис. 8. Внутренние волны различного происхождения вблизи южного побережья Крыма. Фрагмент панхроматического изображения OLI Landsat-8 (8-й спектральный канал) от 01.08.2013

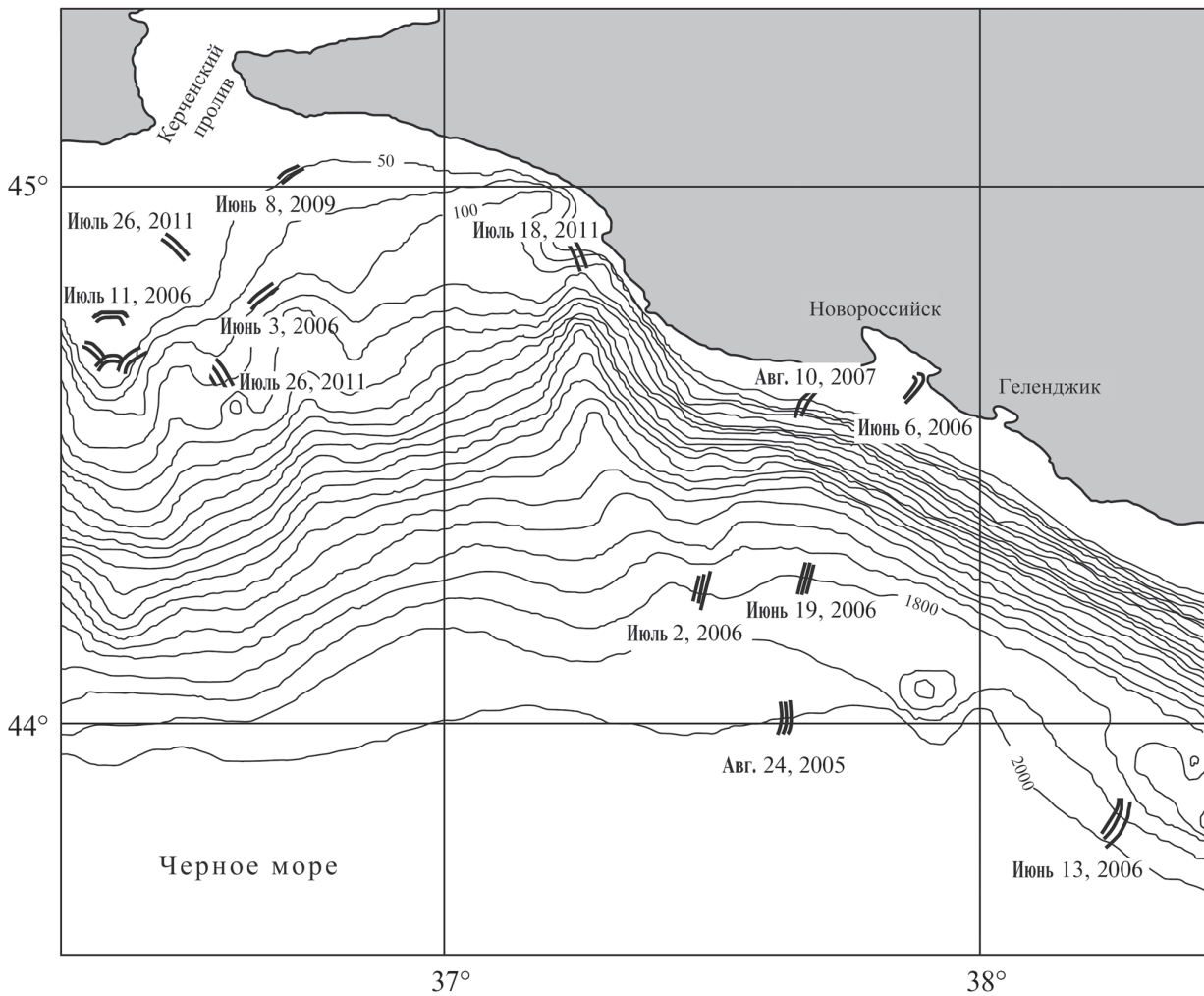


Рис. 9. Карта-схема распределения поверхностных проявлений внутренних волн в северо-восточной части Черного моря, выявленных на радиолокационных изображениях 2005–2011 гг.

На основе совместного анализа данных спутниковой радиолокации и ИК изображений, полученных в близкие моменты времени, нами было показано, что подавляющее большинство ППВВ в северо-восточной части Черного моря локализовано вблизи границы вихря или гидрологического фронта (Лаврова и др., 2009, 2011а; Mityagina et al., 2010). Это позволяет сделать вывод о фронтальном механизме генерации внутренних волн, когда волны излучаются нестационарным фронтом (движущимся и/или подверженном инерционным колебаниям), связанным с прохождением холодного вихря (рис. 10).

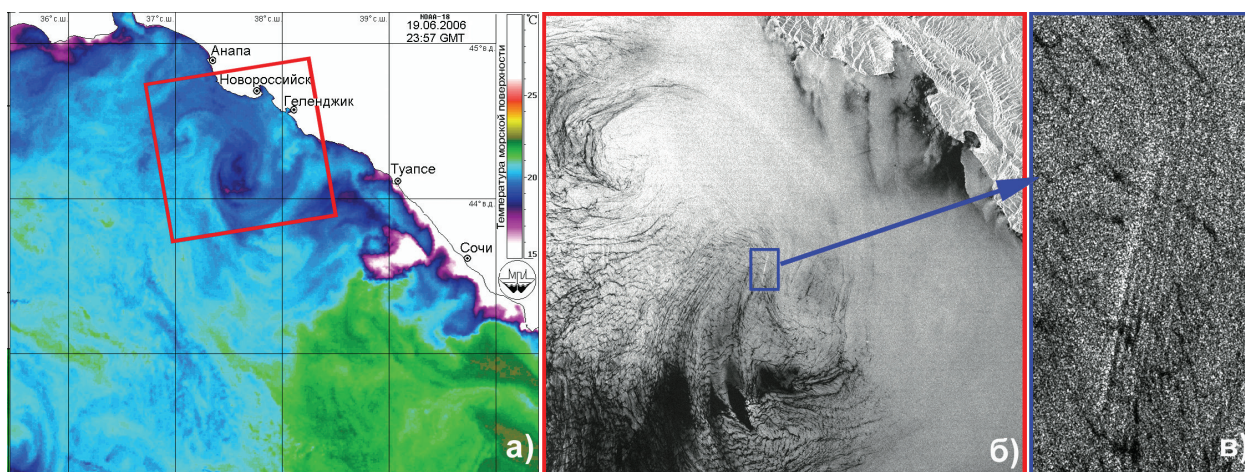


Рис. 10. Проявление внутренних волн на границе антициклонической составляющей вихревого диполя: а) проявление вихревого диполя в поле температуры по данным AVHRR NOAA от 19.06.06 23:57 UTC. Красный прямоугольник соответствует положению кадра РЛИ; б) РЛИ ASAR Envisat, полученное 19.06.06 в 19:10 UTC; в) РЛ-образы поверхностных проявлений пакета ВВ

Анализ данных гидрофизического зондирования *in-situ* показал, что максимальная встречаемость ППВВ соответствует наличию резкого и неглубокого пикноклина. Такие условия благоприятствуют как зарождению внутренних солитонов, так и выраженному проявлению их на морской поверхности, поскольку способствует развитию сильных орбитальных течений в приповерхностном слое. Это в свою очередь приводит к модуляции спектра ветрового волнения и проявлению внутренних волн на РЛИ морской поверхности. Такая благоприятная ситуация сложилась в июне – начале июля 2006 г. Половина выявленных нами ППВВ на РЛИ в северо-восточной части Черного моря приходится на этот период.

Подспутниковые измерения параметров внутренних волн в Черном море

Актуальность исследований внутренних волн, проводимых традиционными контактными и акустическими методами на Черном море, возросла в последние годы вследствие появившихся возможностей регистрации спутниковых радиолокационных изображений морской поверхности с недостижимым ранее разрешением в единицы метров. Проводимые подспутниковые эксперименты имеют своей целью уточнение механизмов генерации внутренних волн и их параметров (в частности, пространственного строения поля волн) и динамики. Особенный интерес представляет связь внутренних волн с их поверхностными

проявлениями, а главное – необходимо прояснить вопрос, при каких условиях возможно их проявление на спутниковых изображениях. Для решения всех вышперечисленных задач необходим сбор данных о внутренних волнах одновременно с проведением спутниковых съемок районов. Первые удачные результаты подспутниковых наблюдений внутренних волн на геленджикском шельфе Черного моря и у южного берега Крыма получены в 2012–2013 гг. и представлены в статье (Лаврова и др., 2013).

В течение летне-осеннего сезонов в 2012 и 2013 гг. нами были проведены обширные исследования внутренних волн на черноморском шельфе, охватившие два района моря. Измерения проводились на северо-восточном шельфе вблизи Геленджика и Голубой бухты и на крымском шельфе у п. Кацевели со стационарной морской платформы Морского гидрофизического института. Исследование внутренних волн на шельфах Черного моря велось с помощью заякоренных многосуточных станций, оснащенных автономными датчиками температуры, а также с помощью съемок на разрезах, проводимых с судов малого тоннажа, оснащенных акустическим доплеровским профилометром течений (ADCP). Для слежения за положением термоклина применялся минизонд скорости звука и температуры. Чтобы максимально охватить термоклин, в водной толще были установлены заякоренные станции с гирляндами из 10 термисторов. Во время работ на кавказском шельфе проводились съемки с буксировками ADCP. На платформе Кацевели ADCP был установлен стационарно, смотрящим вниз, что позволяло вести многосуточную регистрацию течений по всей водной толще. 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 2012 г., были зафиксированы ВВ, длина которых составляла в среднем 100 м, а амплитуда колебалась в пределах 8–12 м. ВВ распространялись в сторону берега (рис. 11).

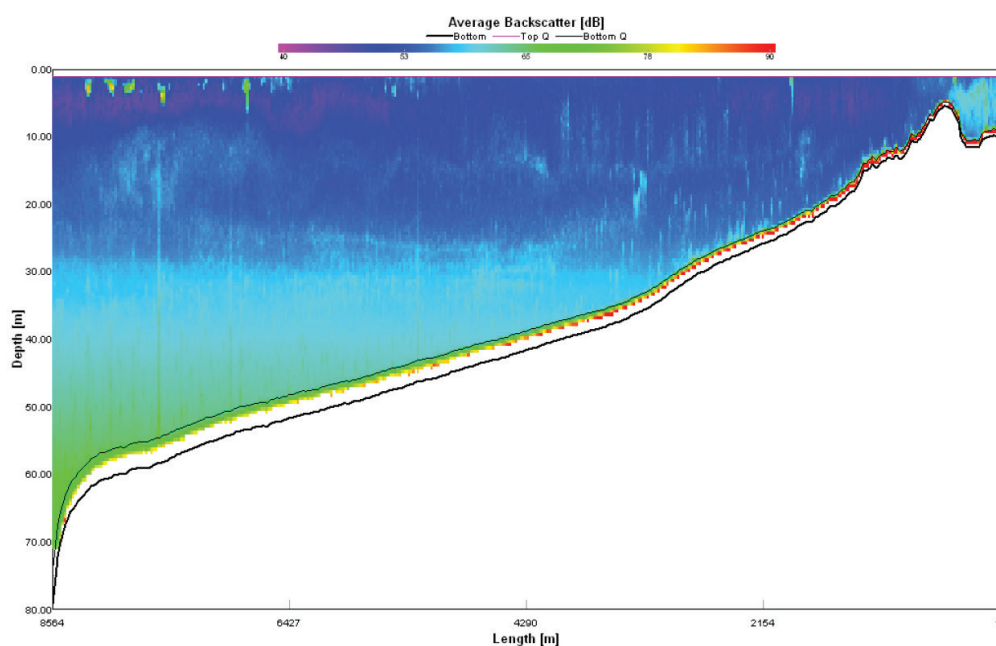


Рис. 11. Проявление внутренних волн на записи эхо-сигнала ADCP 16.09.2012

При совместном анализе данных радиолокационной съемки TerraSAR-X и измерений с помощью ADCP (рис. 12) были детектированы поверхностные проявления этих ВВ в виде трех параллельных сликовых полос. Длина волны, определенная по радиолокационному изображению, составляла 90 м, что находится в хорошем соответствии с данными ADCP. Всего за две серии измерений (июнь и сентябрь 2012 г.) было зафиксировано шесть случаев проявления ВВ в районе г. Геледжика 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 (где расположен термоклин) в некоторых случаях достигала 10°C.

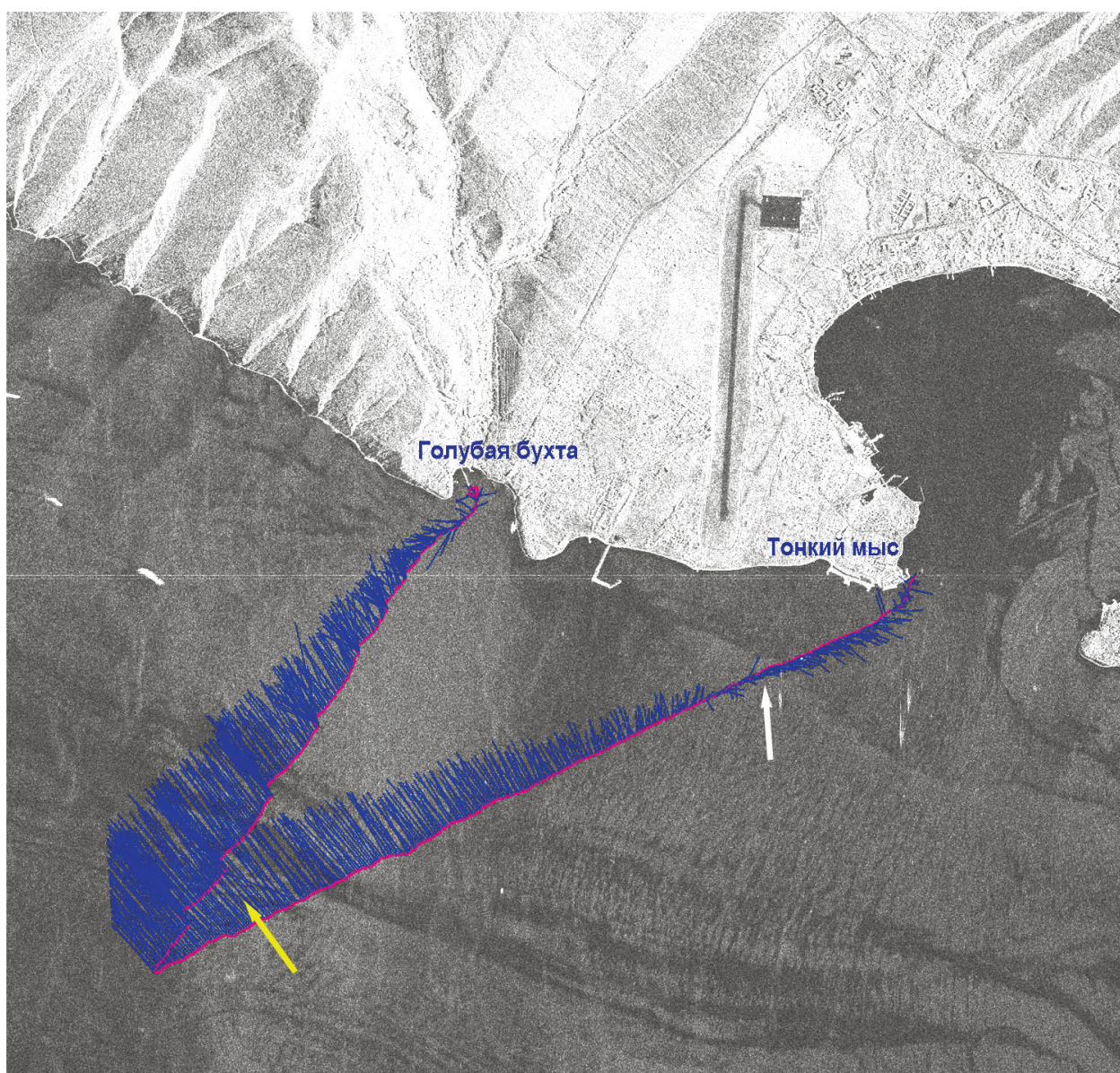


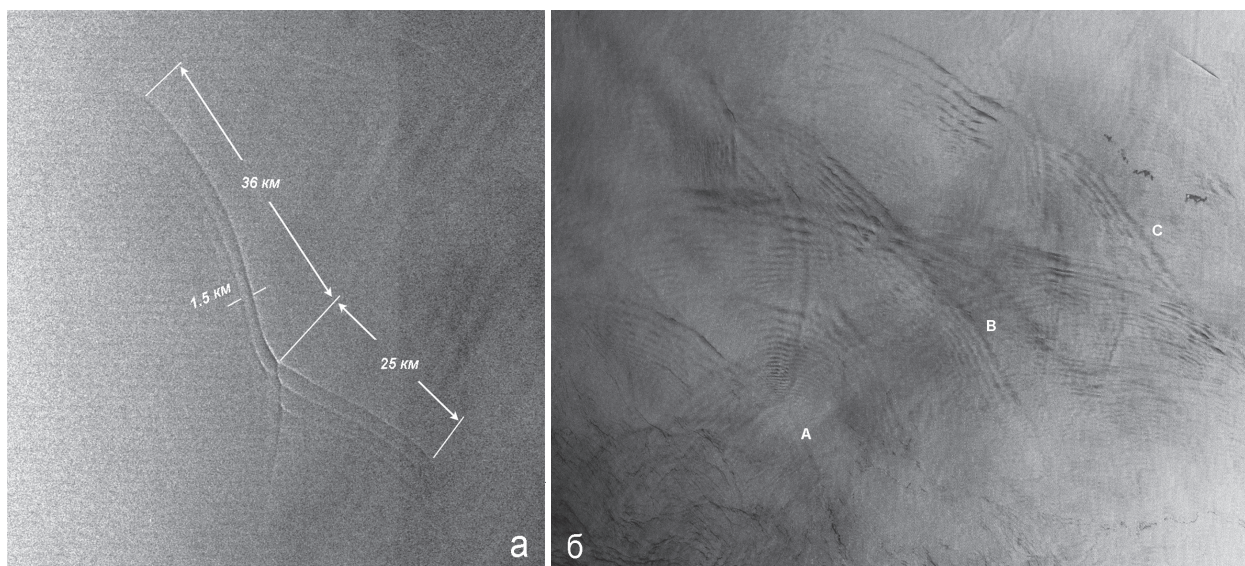
Рис. 12. Фрагмент РЛИ TerraSAR-X от 16.09.2012. Синим цветом отмечены скорость и направление течения по данным ADCP в период спутниковой съемки. Белая стрелка указывает на слик, расположенный в области смены направления течения. Желтая стрелка указывает на положение поверхностных проявлений внутренних волн

Результаты подспутниковых измерений параметров внутренних волн позволяют сделать следующие выводы: в обоих исследуемых районах было отмечено частое появление интенсивных квазиинерционных внутренних волн (период около 17 ч), а также цугов короткопериодных внутренних волн. Короткопериодные внутренние волны – характерное явление, присущее шельфовой зоне Черного моря. Измерения показали, что в каждом районе часто наблюдались колебания термоклина коротких (минутных) периодов. Для района Геленджика на спектрах отмечается наличие пиков в диапазоне частот 4–10 цикл/ч, что соответствует периодам волн диапазона 6–15 мин. Для района Кацивели диапазон частот спектральных пиков варьирует от 10 до 20 цикл/ч, т.е. здесь преобладают более высокочастотные короткопериодные волны с периодом в 3–6 мин. Амплитуды волн достигают порядка 10 м, а длины в среднем – 100 м. Несмотря на частое проявление ВВ в данных натурных измерений, ППВВ на спутниковых изображениях, получаемых синхронно с измерениями *in-situ*, крайне редки. В связи со спецификой природы и сложностью строения внутренних волн для понимания их особенностей в бесприливном море требуется проводить сбор информации о них как можно более длительное время и охватывать большие районы и акватории.

Внутренние волны в Каспийском море

Поверхностные проявления внутренних волн в Каспийском море, выявленные на спутниковых изображениях, отличаются большим разнообразием. На одном кадре РЛИ (430 км x 400 км) часто выявляется несколько цугов ВВ, что свидетельствует о наличии нескольких мест генерации, расположенных на относительно небольшом расстоянии. Поверхностные проявления наблюдаемых ВВ в Каспийском море имеют вид классических цугов солитонов. Для взаимодействующих цугов наблюдаются характерные для нелинейных взаимодействий искривления фронтов, фазовые сдвиги и пр. Как правило, цуги распространяются к берегу и наблюдаются над глубинами 50–200 м. Длина ведущей волны в цуге может достигать 1,5 км, а протяженность фронтов до 50 км (*рис. 13а*). Ширина цуга зависит от количества волн, входящих в него, в среднем она составляет 2,5 км, но может достигать и 6 км.

Достаточно часто фронты в цуге представляют собой концентрические дуги, что дает возможность с определенной точностью выявить район генерации данного цуга. Как правило, это неоднородности рельефа, банки, резкие поднятия дна, все это характерно именно для восточного склона Среднего Каспия. На *рис. 13б* представлен фрагмент изображения, полученного в результате композиции 3, 2 и 1 каналов ЕТМ+ Landsat-7. Съемка проводилась в области солнечного блика, и, в отличие от РЛИ, на которых передний фронт проявляется в виде яркой светлой полосы, что соответствует усилению рассеяния радиолокационного сигнала и, соответственно, сулою (Булатов и др., 2003), на данном оптическом изображении ППВВ проявляются в виде темных полос. На этом фрагменте хорошо различаются несколько цугов, распространяющихся под углом друг к другу. Расстояние между цугами А и В, В и С составляет соответственно 14 и 13 км. Расчеты показывают, что данные цуги распространяются со скоростью примерно 50 см/с. Близкие оценки скорости распространения цугов ВВ получены и для других случаев.



*Рис. 13. Поверхностные проявления внутренних волн в Каспийском море:
 а) характерные пространственные характеристики. Фрагмент ASAR Envisat изображения от 24.07.09;
 б) множественные проявления пакетов, распространяющихся в виде концентрических окружностей.
 Средняя длина волны – 750 м. Буквами отмечены цуги, для которых вычислялась
 скорость распространения цугов. Фрагмент цветосинтезированного изображения
 ETM+ Landsat 7 от 31.05.09*

На основе большого архива спутниковых изображений была выявлена сезонная зависимость районов проявлений ВВ в Каспийском море. Так, например, проведенный в 2009 г. спутниковый мониторинг акватории Каспийского моря показал, что все многочисленные поверхностные проявления цугов ВВ зарегистрированы в период с третьей декады мая до конца августа. Прослеживается четкая сезонная зависимость локализации ВВ: если в мае – начале июня ВВ наблюдались в южном Каспии, то по мере прогрева воды в течение лета места зарождения и распространения ВВ сдвигались на север. Время массового проявления ВВ (июнь – первая половина июля) связано, на наш взгляд, с формированием сезонного термоклина. В Среднем и Южном Каспии в летний период величина солености относительно постоянна по глубине, поэтому в первом приближении можно считать, что градиент плотности пропорционален только градиенту температуры. Со второй половины июля происходит сильный прогрев воды до больших глубин, скачок термоклина неярко выражен и прижат ко дну. Как показывают контактные измерения, проводившиеся в данном районе осенью 1972 и летом 1973 гг., во второй половине лета и осенью ВВ либо совсем отсутствовали, либо имели сравнительно небольшую высоту (Коняев, 1975). Соответственно, нет и поверхностных проявлений, которые можно было бы обнаружить на спутниковых изображениях. Большая часть ППВВ была выявлена в восточной части Каспийского моря севернее Апшеронского порога в районе 40° с.ш., 52° в.д.

В отсутствие существенных приливов основным механизмом, приводящим к генерации внутренних волн в Каспийском море, являются продольные одноузловые сейши, узел которых находится вблизи Апшеронского порога, а частота колебаний составляет 8,5–9 часов. Возможным механизмом генерации ВВ может служить релаксация апвеллинга, который часто формируется вблизи восточного побережья. Кроме того, зарегистри-

рованы случаи возбуждения внутренних волн в море непосредственно перед границей движущегося атмосферного фронта (рис. 14). Подробное описание ППВВ в Каспийском море дано в нашей монографии (Лаврова и др., 2011а) и статьях (Лаврова и др. 2011б,в).

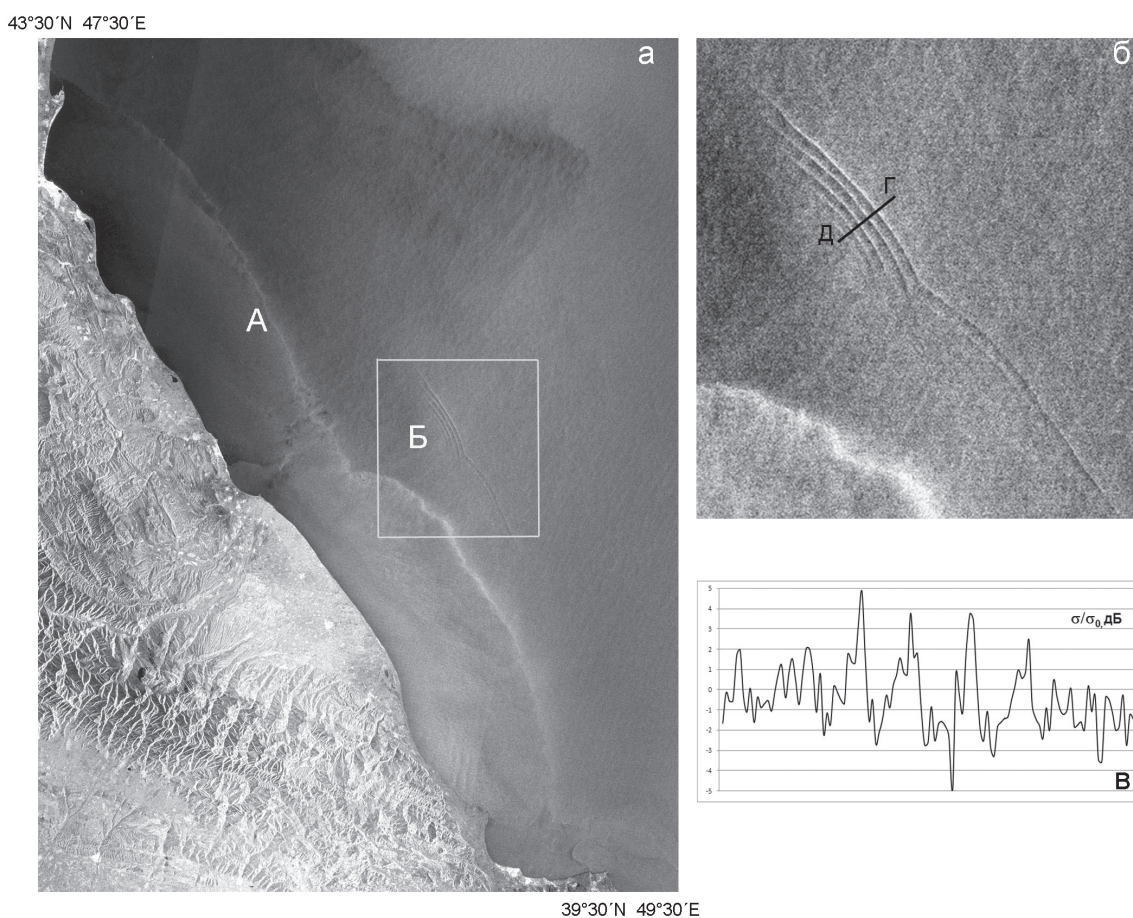


Рис. 14. Проявления цуга внутренних волн вблизи атмосферного фронта:
 а) ASAR Envisat изображение морской поверхности от 11.09.10. Буквой «А» отмечен скачкообразный перепад радиолокационного сигнала, являющийся отражением наземной линии перемещающегося атмосферного фронта. Цуг внутренних волн отмечен буквой «Б»; б) увеличенный фрагмент Envisat ASAR изображения, отображающий проявление внутренних волн в море; в) вариации радиолокационного сигнала, обусловленные поверхностными проявлениями ВВ, вдоль линии ГД

Внутренние волны в Балтийском море

Балтийское море представляет собой неглубокое шельфовое море с преобладающими глубинами от 40 до 100 м. Колебания уровня, связанные с приливами, крайне невелики, их размер меняется от 4 см (Клайпеда) до 10 см (Финский залив). Поверхностные проявления внутренних волн в Балтийском море – достаточно редкое явление, и работы, посвященные их спутниковым наблюдениям, практически отсутствуют. В то же время контактные измерения ВВ в толще вод проводятся регулярно. Как показывает опыт, наблюдение ППВВ средствами спутниковой радиолокации в акватории Балтийского моря представляется затруднительным. Метеоусловия над Балтикой нестабильны. Усложнение гидрометеорологических условий – усиление или ослабление приводного ветра (штиль, ветровая тень), развитие волнения, цветение

водорослей, выпадение интенсивных осадков, прохождение резких атмосферных и ветровых фронтов, появление внутренних волн в атмосфере – все это затрудняет распознавание ППВВ. Наблюдения показали, что радиолокационные образы атмосферных явлений в этом регионе занимают большую часть площади практически каждого РЛИ, а обусловленные ими вариации интенсивности радиолокационного сигнала достаточно высоки, что зачастую приводит к невозможности идентификации ППВВ (Митягина, Лаврова, 2010). Все выявленные нами в Балтийском море ППВВ представляли собой одиночные пакеты, число волн в цуге, как правило, не превышало шести, максимальная длина волны не превышала 1 км, а длина фронта ведущей волны, как правило, была не больше 25 км. Все они наблюдались в июле – августе.

По нашему мнению, одним из основных источников ВВ в Балтийском море являются динамические процессы в атмосфере, осуществляющие передачу энергии океану при изменениях атмосферного давления, касательных напряжений ветра и потока плавучести на его поверхности (Ле Блон, Майсек, 1981). Возможность генерации ВВ в результате прямых атмосферных воздействий изучалась как теоретически, так и в ходе натурных исследований (Леонов, Миропольский 1973; Иванов и др., 1985). Перемещающиеся фронты и зоны атмосферных возмущений не являются квазистационарными, а при перемещении нестационарной аномалии атмосферного давления происходит возбуждение ВВ, не затухающих при удалении от зоны генерации. Натурные исследования (Иванов и др., 1985) подтвердили, что короткопериодные ВВ могут также возбуждаться в короткий срок после резкого усиления ветра. Так, например, при прохождении атмосферного фронта, распространяющегося с запада на восток, 4 августа 2014 г. вблизи Самбийского полуострова сформировался цуг внутренних волн, поверхностные проявления которого хорошо видны на радиолокационном изображении TerraSAR-X (рис. 15).

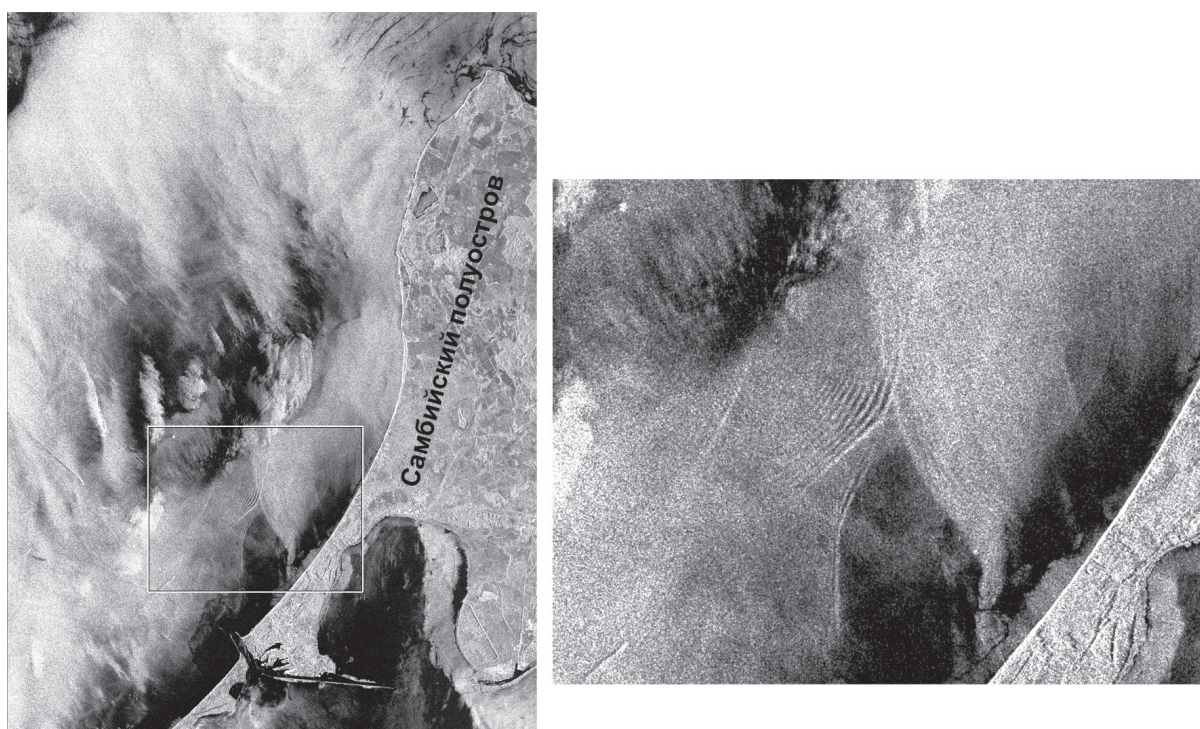


Рис. 15. Проявление цуга внутренних волн перед атмосферным фронтом в юго-восточной части Балтийского моря. Фрагмент TerraSAR-X изображения от 04.08.14. Справа увеличенный фрагмент, положение которого обозначено прямоугольником

В Датских проливах, соединяющих Балтийское море с Северным морем, ВВ вызываются внутренними приливами, имеют вид классических солитонов и формируются на границе раздела вод с разной плотностью, которая связана не с формированием сезонного термоклина, как это происходит, например, в Каспийском море, а с галоклином, формирующимся за счет разности в солености Балтийского и Северного морей. Этим объясняется тот факт, что ВВ в Датских проливах наблюдаются в любое время года (Lavrova et al., 2014).

Гидродинамические процессы в морских проливах

Морские проливы соединяют бассейны, воды которых, как правило, сильно отличаются по физическим, химическим и биологическим характеристикам, и являются именно той зоной, в которой происходит водообмен между указанными бассейнами. Проливы имеют свои особенности гидрологического режима, отличающиеся от режима прилегающих глубоководных районов океана и моря. Атмосферные и внутриокеанические процессы, протекающие в зоне проливов, а также особенности орографии и рельефа дна оказывают решающее влияние на формирование структуры вод и на возникновение и дальнейшее развитие внутренних волн, вихрей и вихревых цепочек, фронтов и боров. Сложные структуры течений, сопутствующие этим явлениям, проявляются на морской поверхности и могут быть зафиксированы из космоса современными средствами дистанционного зондирования.

Нами проводились исследования, направленные на определение параметров течений и выявление особенностей гидродинамических процессов в Керченском и Беринговом проливе, а также на изучение механизмов генерации внутренних волн в проливе Ломбок. Особый интерес представляют результаты, полученные нами для Берингова пролива. Представляется чрезвычайно важным понимание процессов, происходящих в проливе, так как они играют огромную роль не только в обмене Арктическими и Тихоокеанскими водными массами, но и в глобальной циркуляции Мирового Океана. Хорошо известно, что существует почти постоянное северное течение (из Тихого океана в Северный Ледовитый), связанное с различиями в уровнях Берингова и Чукотского морей. Однако временами происходит изменение направления течения: заток холодных Арктических вод, который продолжается в течение от 2 до 10 дней. Причины данного явления в настоящее время практически не изучены, а между тем оно имеет огромное значение для прогноза погоды, судоходства и рыболовства в данном районе. Единственным приемлемым методом регулярного мониторинга течений в Беринговом проливе может быть только космическое радиолокационное зондирование (судовые контактные измерения очень дороги, а другие дистанционные методы неэффективны, потому что большую часть года над проливом стоит туман). На радиолокационных изображениях поля течений выявляются косвенным образом, по их влияниям на поверхностные, внутренние, «подветренные» волны и т. п. Прямые проявления течений возможны только при

использовании многоканальных радаров. На выбранных нами изображениях Берингова пролива «индикаторами» течения являлись океанские процессы за островами. Примерно на полпути между Чукоткой и Аляской находятся острова Ратманова (Большой Диомид) и Крузенштерна (Малый Диомид). Расстояние между островами порядка 4 км. Направление течения в центральной части Берингова пролива легко определялось по «кильватерным следам» за островами, или по наличию гидрологического фронта. Яркий контраст радиолокационного сигнала в проливе соответствует температурному фронту: границе между холодными водами Чукотского моря и более теплыми водами Берингова моря. Различным температурам поверхности воды соответствует различное поверхностное натяжение воды, а, следовательно, и различные спектры ряби, на которой происходит отражение радиолокационного сигнала (Lavrova et al., 2003).

Восстановление пространственно-временных характеристик среднего течения возможно также на основе анализа радиолокационных образов вихревых дорожек или дорожек Кармана, образующихся при обтекании набегающим потоком небольших островов. В восточной части Берингова пролива в 15 км к юго-востоку от острова Крузенштерна находится скала Фэруэй. Поперечные размеры ее не превышают 500 м, и она является прекрасным генератором вихревых дорожек. Исследование вихревых структур за плохо обтекаемыми телами – классическая задача гидродинамики. Ей посвящено большое число теоретических работ и лабораторных экспериментов. Основные результаты изложены в монографии (Batchelor, 2000). Характер образующихся за препятствием вихревых дорожек зависит от числа Рейнольдса – $Re=2UD/\nu$, где U – скорость невозмущенного набегающего потока, D – линейный размер препятствия и ν – кинематическая вязкость. При малых числах Рейнольдса образование вихрей за препятствием не наблюдается. По мере увеличения числа Рейнольдса сначала образуются одиночные вихри сразу за препятствием, а потом дорожки Кармана, состоящие из циклонических и антициклонических вихрей, расположенных в шахматном порядке.

Детальный анализ радиолокационных изображений, полученных в районе Берингова пролива с помощью ERS-1-2 и Radarsat-1, показал, что за скалой Фэруэй наблюдается большое разнообразие вихревых дорожек, вид которых зависит в первую очередь от скорости набегающего потока: от слабо выраженного одиночного вихря (так называемого «хвоста»), до грибовидных вихрей (рис. 16). В среднем хорошо развитая вихревая дорожка состоит из 6–7 вихрей, размеры которых увеличиваются по мере удаления от препятствия, а общая длина наблюдаемой вихревой структуры не превышает 30 километров. Отличительной особенностью вихревой дорожки за данным препятствием является то, что она представляет собой цепочку одиночных вихрей в отличие от классической дорожки Кармана. Это вызвано асимметричной формой скалы Фэруэй. Радиолокационные изображения позволили проанализировать различные виды вихревых дорожек и решить «обратную» задачу: характеру наблюдаемой вихревой цепочки ставилось в соответствие (исходя из теоретических представлений) число Рейнольдса, а по нему оценивалась скорость набегающего потока. Максимальное значение рассчитанной скорости течения составило 130 см/с, а минимальное,

при котором начинают образовываться вихревые дорожки, – 50 см/с. Полученные величины сравнивались с результатами контактных измерений, описанными в работе американских исследователей (Roach et al., 1995.) Выявлено практически полное совпадение вычисленных и измеренных данных.

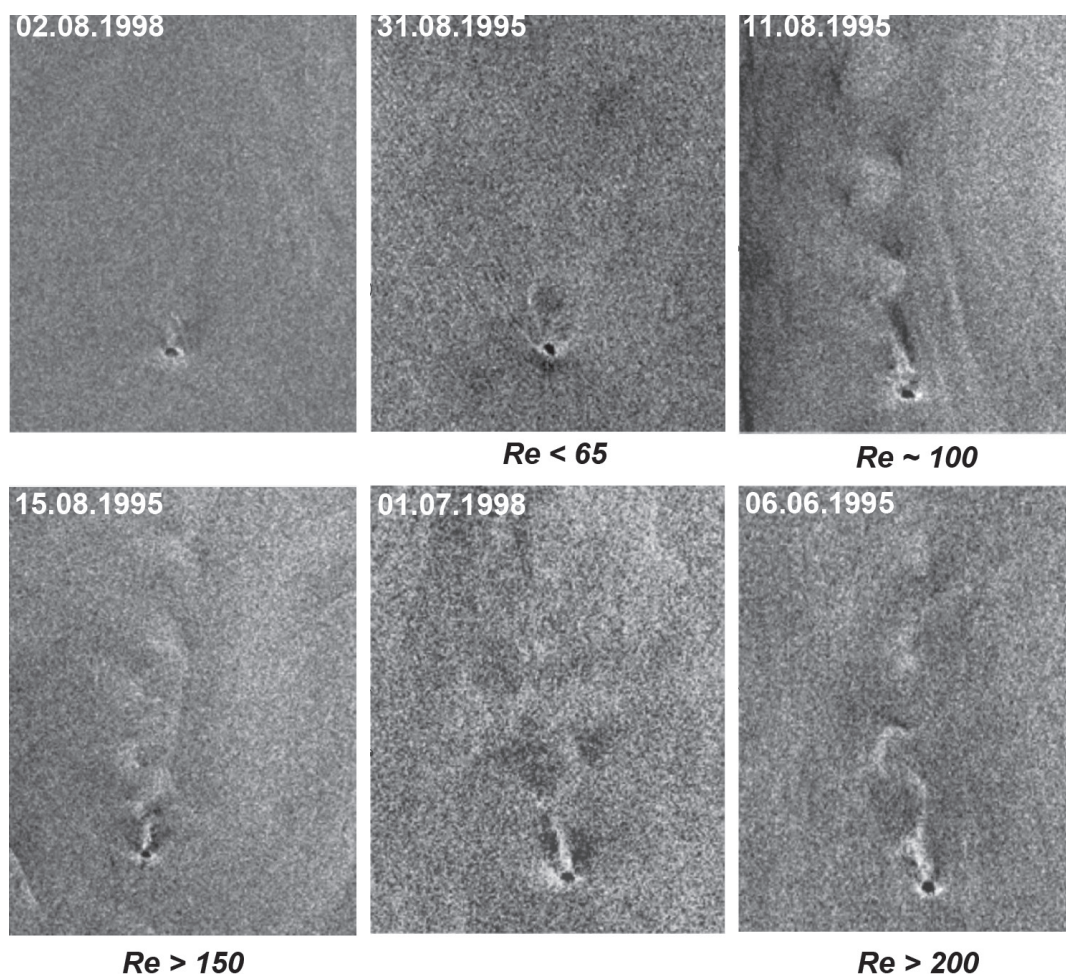


Рис. 16. Поверхностные проявления вихревых дорожек за скалой Фэруэй на снимках SAR ERS-1-2

Специфические формы проявления гидродинамических процессов на спутниковых изображениях

Помимо таких хорошо известных процессов, проявляющихся на поверхности моря, как внутренние солитоны у края шельфа и над подводными порогами, гидрологические фронты и вихри, вихревые дорожки и волны за препятствиями и т.п., на спутниковых изображениях морской поверхности встречаются неоднородности, специфическая форма которых не всегда и не везде объяснима в рамках сложившихся представлений.

В рамках проведения многолетнего многосенсорного спутникового мониторинга Черного, Балтийского и Каспийского морей на спутниковых изображениях, полученных в радио

и видимом диапазоне электромагнитного спектра, нами выявлены поверхностные проявления внутриводных процессов, среди которых своими необычными формами, локализацией и временем появления выделяются следующие.

1. Перпендикулярные к берегу плотно упакованные полосы пониженной и повышенной интенсивности обратно-рассеянного радиолокационного сигнала вдоль почти всего норвежского берега пролива Скагеррак, имеющие радиолокационные образы идентичные внутренним солитонам (рис. 17а). Такие полосчатые структуры отличаются большим количеством полос, заполняющих примыкающую к норвежскому берегу акваторию, и характеризуются небольшими масштабами. Они наблюдаются только в этом районе и только зимой, и явно не связаны с периодическими течениями, обычно генерирующими внутренние солитоны.
2. Многочисленные проявления внутренних солитонов различных направлений в районах, где нет значительных периодических течений, но возможны нестационарные фронты расплывающихся в приповерхностном слое речных вод (в частности, в акватории вблизи дельты Дуная).
3. Узкие и длинные полосы вложенных друг в друга мелкомасштабных сликовых дуг, окаймляющих струи мезо- и субмезомасштабных вихрей (рис. 18).
4. «Кольчатые трубки», состоящие из почти 40 колец и направляющих, образованных сликами (рис. 17б).

Список таких явлений может быть продолжен.

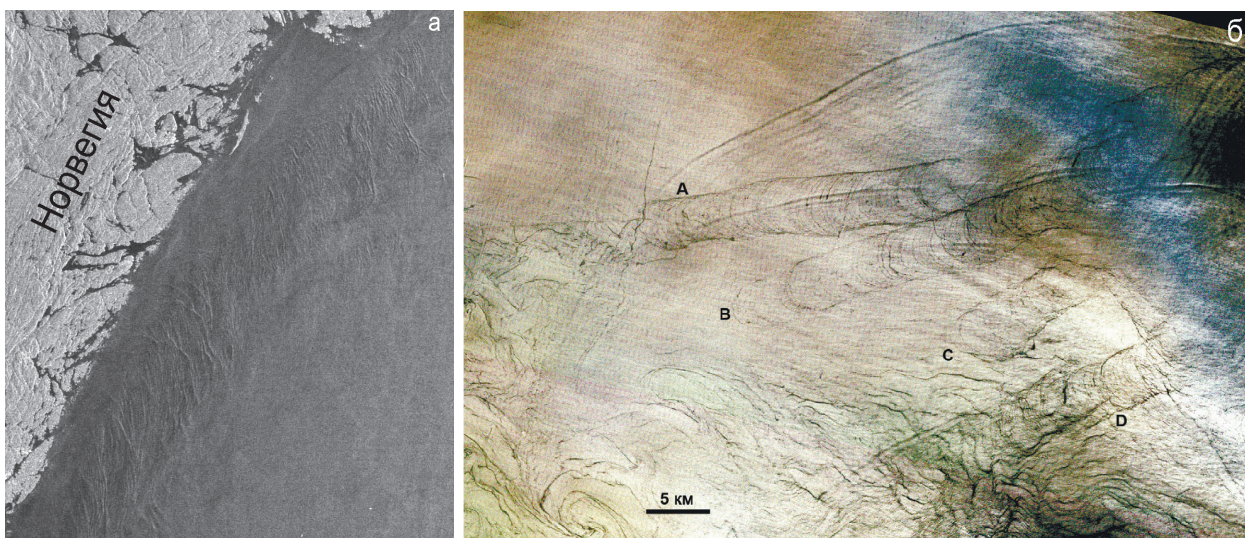


Рис. 17. Специфические проявления гидродинамических процессов на морской поверхности: а) плотно упакованные полосы пониженной и повышенной интенсивности обратно-рассеянного радиолокационного сигнала вдоль почти всего норвежского берега пролива Скагеррак. Фрагмент ASAR Envisat изображения от 20.12.2011; б) кольчатые трубки на дунайском шельфе (обозначены буквами). Фрагмент TM Landsat-5 отображения от 23.06.2011

Если первые три процесса наблюдаются на спутниковых изображениях регулярно, то «кольчатые трубки» ранее не встречались. Попытки связать происхождение этих загадочных структур с антропогенной деятельностью или какими-либо известными естественными

процессами в воздухе и воде, оказались безуспешными в силу таких не встречавшихся ранее особенностей, как вытягивание в длинные полосы мало меняющихся по ширине кольцевых организованных повторяющихся структур и т. п. В то же время концентрация образующих трубки сликов вдоль почти правильных окружностей, скорее всего, свидетельствует о том, что первопричиной являются инерционные движения. Нами была предложена феноменологическая модель для объяснения этого интересного явления (Сабинин, Лаврова, 2015). Краткое объяснение происхождения «кольчатых трубок» может быть сформулировано следующим образом:

1. причиной проявления инерционных движений на поверхности моря в виде колец является их локализация у границы проникновения ослабевающего со временем потока, когда за счет конвергенции у этой границы образуется полоса поверхностно-активных веществ (ПАВ), вовлекаемых в инерционное вращение;
2. причиной образования многих вложенных друг в друга колец является расчленение сплошной граничной полосы ПАВ на отдельные агрегации вергенциями относительно мелкомасштабных течений вдоль этой полосы;
3. причиной периодичности колец в кольчатых трубках является периодичность вергенций в поле мелкомасштабных течений вдоль граничной полосы ПАВ.

Что касается плотно упакованных полос пониженной и повышенной интенсивности обратно-рассеянного радиолокационного сигнала вдоль почти всего норвежского берега пролива Скагеррак, то это, скорее всего, проявление внутренних присоединённых волн, порождённых течением, обтекающим неровности края шельфа, которыми изобилует подводный рельеф пролива. Эта гипотеза еще требует строгого физического обоснования.

Заключение

Исследование гидродинамических процессов – одно из интереснейших направлений спутниковой океанологии. Несмотря на то, что их изучением занимаются многие научные коллективы всего мира, далеко не все задачи еще решены. Надеемся, что исследования, проводимые в ИКИ РАН, способствуют решению хотя бы части из них. Появление новых приборов на орбите, относительная доступность большого количества различной спутниковой информации с высоким пространственным и спектральным разрешением, развитие информационных технологий, позволяющих оперативно получать, обрабатывать и анализировать спутниковые изображения, несомненно, позволят серьезно продвинуться в ближайшие годы в изучении морских процессов. Наличие в ИКИ РАН собственного комплекса океанологических приборов позволяет проводить серьезные натурные измерения, необходимые для валидации спутниковых данных. А главное, что такая «живая» и интересная работа привлекает молодежь. Авторы благодарят выпускников МГУ имени М.В. Ломоносова Каримову С.С., Краюшкина Е.В., Назирову К.Р., Калашникову Н.А. и Бойченко Д.А., принимающих самое активное участие как в проведении экспериментов, обработке данных,

так и в анализе спутниковой информации. Надеемся, что они продолжат наши работы по исследованию Океана из космоса.

Особую благодарность авторы выражают всем сотрудникам лаборатории Аэрокосмической радиолокации, которые являются активными участниками всех наших работ. Также мы хотим выразить благодарность нашим коллегам из Института океанологии РАН имени П.П. Ширшова, в первую очередь Гинзбург А.И., Костяному А.Г. и Зацепину А.Г., совместная работа с которыми была нам очень полезна.

Работы по исследованию субмезомасштабных вихрей и внутренних волн проводились при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках нескольких инициативных проектов и темы «Мониторинг» (Гос. Регистрация № 01.20.0.2.00164).

Исследование и модельное описание выявленных на спутниковых изображениях специфических проявлений внутриводных гидродинамических процессов осуществляется при финансовой поддержке гранта РФФИ 14-05-00520. Исследование влияния динамических и циркуляционных процессов на распространение антропогенных и биогенных загрязнений морской поверхности на основе комплексного использования спутниковой информации проводится при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках гранта 14-17-00555.

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. Булатов М.Г., Кравицов Ю.А., Лаврова О.Ю., Литовченко К.Ц., Митягина М.И., Раев М.Д., Сабинин К.Д., Трохимовский Ю.Г., Чурюмов А.Н., Шуган И.В. Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // Успехи Физических Наук. 2003. Т. 173. № 1. С. 69–87.
3. Власенко В.И., Иванов В.А., Красин И.Г., Лисиченок А.Д. Генерация интенсивных короткопериодных внутренних волн в шельфовой зоне Крыма во время протекания прибрежного апвеллинга // Морской гидрофизический журнал. 1997. № 3. С. 3–16.
4. Гинзбург А.И., Федоров К.Н. Некоторые закономерности развития грибовидных течений в океане, выявленные путем анализа спутниковых изображений // Исследование Земли из космоса. 1984. № 6. С. 3–13.
5. 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.
6. 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.
7. Иванов В.А., Коняев К.В., Серебряный А.Н. Группы интенсивных внутренних волн в шельфовой зоне моря // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1981. Т. 17. № 12. С. 1302–1309.
8. Иванов В.А., Лисиченок А.Д., Немировский А.С. Возбуждение короткопериодных внутренних волн пульсациями ветра // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. № 6. С. 648–656.
9. 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.
10. Иванов В.А., Серебряный А.Н. Внутренние волны на мелководном шельфе бесприливного моря // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1983. Т. 19. № 6. С. 661–665.
11. Иванов В.А., Серебряный А.Н. Короткопериодные внутренние волны в прибрежной зоне бесприливного моря // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. № 6. С. 648–656.
12. Каримова С.С. Статистический анализ субмезомасштабных вихрей Балтийского, Черного и Каспийского морей по данным спутниковой радиолокации // Исследование Земли из космоса. 2012. № 3. С. 31–47.
13. Коняев К.В. Экспериментальное исследование короткопериодных внутренних волн в море // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1975. Т. 11. № 3. С. 285–296.
14. Коняев К.В., Сабинин К.Д. Новые данные о внутренних волнах в море, полученные с помощью распределенных датчиков температуры // Доклады АН СССР. 1973. Т. 209. № 1. С. 86–89.

15. *Коняев К.В., Сабинин К.Д.* Волны внутри океана. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 273 с.
16. *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.
17. *Лаврова, О.Ю.* Стики как индикаторы вихревой активности в прибрежной зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2005. Т. 2. С. 118–123.
18. *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. 2011а. 470 с.
19. *Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д.* Проявление внутренних волн на морской поверхности в северо-восточной части Черного моря // Исследования Земли из космоса. 2009. № 6. С. 49–55.
20. *Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Сабинин К. Д.* Исследование особенностей генерации и распространения внутренних волн в бесприливных морях по данным спутниковой радиолокации // Доклады Академии Наук. 2011б. Т. 436. № 3. С. 407–411.
21. *Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Спутниковые наблюдения поверхностных проявлений внутренних волн в Каспийском море // Исследование Земли из космоса. 2011в. № 2. С. 40–48.
22. *Лаврова О.Ю., Серебряный А.Н., Митягина М.И., Бочарова Т.Ю.* Подспутниковые наблюдения мелкомасштабных гидродинамических процессов в северо-восточной части Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 308–322.
23. *Лаврова О.Ю., Краюшкин Е.В., Соловьев Д.М., Голенко М.Н., Голенко Н.Н., Калашишникова Н.А., Демидов А.Н.* Влияние ветрового воздействия и гидродинамических процессов на распространение вод Калининградского залива в акватории Балтийского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 76–99.
24. *Ле Блон П., Майсек Л.* Волны в океане. М.: Мир, 1981. Т. 1. 480 с.
25. *Леонов А.И., Миропольский Ю.З.* О резонансном возбуждении внутренних гравитационных волн в океане колебаниями атмосферного давления // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1977. Т. 9. № 8. С. 851–862.
26. *Митягина М.И., Лаврова О.Ю.* Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // Исследования Земли из космоса. 2009. № 5. С. 72–79.
27. *Митягина М.И., Лаврова О.Ю.* Спутниковые наблюдения поверхностных проявлений внутренних волн в морях без приливов // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. Т. 7. № 1. 2010. С. 260–272.
28. *Раев М.Д., Шарков Е.А.* Исследования окружающей среды радиофизическими методами. История создания и становление направления «Радиофизические спутниковые исследования Земли» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015. Т. 12. № 5. С. 33–52
29. *Сабинин К.Д., Лаврова О.Ю.* Кольчатые структуры на спутниковых изображениях и вероятная причина их образования (феноменологическая модель) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 93–101.
30. *Серебряный А.Н.* Эффекты нелинейности во внутренних волнах на шельфе // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 1990. Т. 26. № 3. С. 285–293.
31. *Серебряный А.Н.* Проявление свойств солитонов во внутренних волнах на шельфе // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1993. Т. 29. № 2. С. 244–252.
32. *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.
33. *Batchelor G.K.* An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge University Press. 2000. 615 p.
34. *Dreschler-Fischer L., Lavrova O., Seppke B., Gade M., Bocharova T., Serebryany A. and Bestmann O.* Detecting and tracking small scale eddies in the Black sea and the Baltic sea using high-resolution RADARSAT-2 and TERRASAR-X imagery (DTEDDIE) // Proc. IGARSS'2014, Québec City, Canada, 13–18 July 2014. P. 1214–1217.
35. *Eldevik T., Dysthe K.B.* Spiral eddies // Journal of Physical Oceanography, 2002. Vol. 32. No. 3. P. 851–869.
36. *Ivanov A. Yu., Ginzburg A.I.* Oceanic eddies in synthetic aperture radar images // Proc. Indian Academy of Sciences. (Earth Planet. Sci.), 2002. V. 111 (3). P. 281–295.
37. *Jackson C. R., Apel J. R.* An atlas of internal solitary-like waves and their properties // Global Ocean Associates. 2002.
38. *Kao T. W., Pao H. P., Park G.* Surface intrusions, fronts and internal waves: a numerical study // Journal of Geophysical Research. 1978. Vol. 83. C9. P. 4641–4650.
39. *Lavrova O. Yu., Bocharova T. Yu., Sabinin K. D.* SAR observations of dynamic processes in the Bering Strait // Atmospheric and Oceanic Processes, Dynamics, and Climate Change, Eds. Zhaobo Sun. 2003. Vol. 4899. P. 28–35.
40. *Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V., Golenko N. N., Golenko M. N.* Investigation of mechanisms of generation, development and evolution of vortex structures in the northeastern part of the Black Sea and in the southeastern part of the Baltic Sea // Proc. of SPIE. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 9638–24.
41. *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. 2008. P. 463–474.
42. *Lavrova O. Yu., Sabinin K. D., Mityagina M. I.* Ship wake distortion as indicator of spatial current fine structure // Proc. 4th International Workshop Sea SAR 2012. 18–22 June 2012. Tromsø, Norway, ESA / Ed.: ESA. 2012. V. ESA-SP-709, ESA Publications Division, European Space Agency, Noordwijk, The Netherlands.
43. *Lavrova, O., Sabinin K., Mityagina M., Bocharova T.* Internal waves in the Scagerrak Strait // Books of Abstracts IEEE/OES Baltic Symposium 2014, May 26 – 29, 2014, Tallinn, Estonia. P.66.
44. *Lavrova O., Serebryany A., Bocharova T. and 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.

45. Lavrova O., Serebryany A., Bocharova T. Investigation of small scale hydrodynamic processes using high resolution SAR imagery and ADCP data // ESA-SP-722. 2013. ESA Publications Division, European Space Agency, Noordwijk. The Netherlands. 8 p.
46. 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. Vol. 31. No. 17. P. 4779–4790.
47. Munk W., Armi L., Fisher K., Zachariassen F. Spirals on the sea. Proc. Roy. Soc. 2000. 456A, P. 1217–1280.
48. Nash J.D., Moum J.N. River plumes as a source of large-amplitude internal waves in the coastal ocean // Nature. 2005. 437. P. 400–403.
49. Pan J., Jay D.A., Orton P.M. Analyses of internal solitary waves generated at the Columbia River plume front using SAR imagery // Journal of Geophysical Research. 2007. Vol. 112. C07014, doi:10.1029/2006JC003688.
50. Roach A.T., Aagaard K., Pease C.H., Salo S.A., Weingartner T., Pavlov V., Kulakov M. Direct measurements of transport and water properties through the Bering Strait // Journal of Geophysical Research. 1995. Vol. 100 (C9). P. 18443–18457.
51. Scully-Power P. Navy Oceanographer Shuttle Observations, STS 41-G, Mission Report. Naval Underwater Systems Center Tech. Rep. NUŠC TD 7611, 1986. 71 p.
52. Stashchuk N., Vlasenko V. Generation of internal waves by a supercritical stratified plume // J. Geophysical Research. 2009. V. 114. C01004, doi: 10.1029/2008JC004851.

Study of hydrodynamic processes in the shelf zone based on satellite data and subsatellite measurements

O.Yu. Lavrova, M.I. Mityagina, K.D. Sabinin, A.N. Serebryany

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

The paper presents an overview of studies conducted in the Department of Earth Research from Space of Space Research Institute RAS in the field of hydrodynamic processes on the sea shelf based on Earth remote sensing data and subsatellite measurements. The main focus was on such processes and phenomena as submesoscale eddies and vertical structures, internal waves, currents in straits. The experimental basis of the studies consisted of satellite data obtained by synthetic aperture radars (SAR) and optical sensors operating in visible and infrared ranges. For purposes of reliable interpretation of satellite data, regular measurements of currents in the northeastern Black Sea and near Crimea Peninsula were conducted concurrently with satellite imaging of those regions. We present the results of joint analysis of remote sensing data and contact measurements of submesoscale eddies and internal waves in the coastal zone.

Regions of frequent occurrence of internal waves in the Black, Caspian and Baltic Seas were determined from the analysis of high resolution satellite data. In non-tidal seas, the main sources of internal wave generation were found to be local fronts due to storm surges, on-shelf intrusions on internal seiches and quasi-inertial internal waves, hydrological fronts associated with inflow of riverine waters.

Results of current velocity and direction retrieval from satellite SAR data for the Bering Strait are presented.

We discuss examples of peculiar manifestations of hydrodynamic processes in satellite images that do not conform to commonly accepted rationale. Phenomenological models explaining their origins are suggested for certain cases.

Keywords: SAR images, satellite monitoring, sea surface, submesoscale eddies, internal waves, currents in strait, Black Sea, Caspian Sea, Baltic Sea, Bering Strait

References

1. Basovich A.Ya., Bakhanov V.V., Talanov V.I., Vliyanie intensivnykh vnutrennikh voln na vetrovoe volnenie (kinematiceskaya model'), *Vozdeistvie krupnomasshtabnykh vnutrennikh voln na morskuyu poverkhnost'* (The impact of large-scale internal waves on the sea surface), Gor'kii: IPF, 1982, pp. 8–30.
2. Bulatov M.G., Kravtsov Yu.A., Lavrova O.Yu., Litovchenko K.Ts., Mityagina M.I., Raev M.D., Sabinin K.D., Trokhimovskii Yu.G., Churyumov A.N., Shugan I.V., Physical mechanisms of aerospace radar imaging of the ocean, *Physics-USpekhi*, 2003, Vol. 46, No. 1, pp. 63–79.
3. Vlasenko V.I., Ivanov V.A., Krasin I.G., Lisichenok A.D., Generatsiya intensivnykh korotkoperiodnykh vnutrennikh voln v shel'fovoi zone Kryma vo vremya protekaniya pribrezhnogo apvellinga (Generation of intense short-period waves in the shelf zone of Crimea during coastal upwelling), *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 1997, No. 3, pp. 3–16.

4. Ginzburg A.I., Fedorov K.N., Nekotorye zakonomernosti razvitiya gribovidnykh techenii v okeane, vyyavlennye putem analiza sputnikovyykh izobrazhenii (Certain development laws of eddy dipoles in ocean derived from satellite images), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1984, No. 6, pp. 3–13.
5. Gorshkov K.A., Dolina I.S., Soustova I.A., Troitskaya Yu.I., Modulation of short wind waves in the presence of strong internal waves: The effect of growth-rate modulation, *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2003, Vol. 39, No. 5, pp. 596–606.
6. Zatsepin A.G., Baranov V.I., Kondrashov A.A., Korzh A.O., Kremenetskii V.V., Ostrovskii A.G., Solov'ev D.M., Submesoscale eddies at the caucasus Black Sea shelf and the mechanisms of their generation, *Oceanology*, 2011, Vol. 51, No. 4, pp. 554–567.
7. Ivanov V.A., Konyaev K.V., Serebryanyi A.N., Gruppy intensivnykh vnutrennikh voln v shel'fovoi zone moray (Groups of intense internal waves on the sea shelf), *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1981, Vol. 17, No. 12, pp. 1302–1309.
8. Ivanov V.A., Lisichenok A.D., Nemirovskii A.S., Vozbuzhdenie korotkoperiodnykh vnutrennikh voln pul'satsiyami vetra (Excitation of short-period internal waves by wind pulsations), *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1985, Vol. 21, No. 6, pp. 648–656.
9. Ivanov V.A., Serebryanyi A.N., Chastotnye spektry korotkoperiodnykh vnutrennikh voln v besprilivnom more (Frequency spectra of short-period internal waves in a non-tidal sea), *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1982, Vol. 18, No. 6, pp. 683–685.
10. Ivanov V.A., Serebryanyi A.N., Vnutrennie volny na melkovodnom shel'fe besprilivnogo moray (Internal waves on a shallow shelf of non-tidal sea), *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1983, Vol. 19, No. 6, pp. 661–665.
11. Ivanov V.A., Serebryanyi A.N., Internal waves in the shallow shelf of a tide-free sea, *Izv. Akad.Nauk SSSR. Fiz. Atmos. Okeana*, 1985, Vol. 21, No. 6, pp. 648–656.
12. Karimova S.S., Statisticheskii analiz submezomasshtabnykh vikhrei Baltiiskogo, Chernogo i Kaspiiskogo morei po dannym sputnikovoi radiolokatsii (Statistical Analysis of Submesoscale Eddies in the Baltic, Black and Caspian Seas Using Satellite SAR Images), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 3, pp. 31–47.
13. Konyaev K.V., Eksperimental'noe issledovanie korotkoperiodnykh vnutrennikh voln v more (Experimental study of short-period internal waves in the sea), *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1975, Vol. 11, No. 3, pp. 285–296.
14. Konyaev K.V., Sabinin K.D., Novye dannye o vnutrennikh volnakh v more, poluchennyye s pomoshch'yu raspredelennykh datchikov temperatury (New data on internal waves in the sea obtained using distributed thermistor set), *Doklady AN SSSR*, 1973, Vol. 209, No. 1, pp. 86–89.
15. Konyaev K.V., Sabinin K.D., *Volny vnutri okeana* (Waves Inside the Ocean), SPb.: Gidrometeoizdat, 1992, 273 p.
16. Kostyanoi A.G., Ginzburg A.I., Sheremet N.A., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Melkomasshtabnye vikhri Chernogo moray (Small-scale eddies in the Black Sea), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 1, pp. 248–259.
17. Lavrova, O.Yu., Sliki kak indykatory vikhrevoi aktivnosti v pribrezhnoi zone (Slicks as indicators of vorticity in coastal zones), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*, 2005, Vol. 2, pp. 118–123.
18. Lavrova O.Yu., Kostyanoi A.G., Lebedev S.A., Mityagina M.I., Ginzburg A.I., Sheremet N.A., *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* (Combined satellite monitoring of the Russian seas), Moscow: IKI RAN, 2011a, 470 p.
19. Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Sabinin K.D., Proyavlenie vnutrennikh voln na morskoi poverkhnosti v severo-vostochnoi chasti Chernogo moray (Manifestations of internal waves on the sea surface in North-Eastern part of the Black Sea), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 6, pp. 49–55.
20. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Sabinin K. D., Study of internal wave generation and propagation features in non-tidal seas based on satellite synthetic aperture radar data. *Doklady Earth Sciences*, 2011b, Vol. 436, No. 1, pp. 165–169.
21. Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Sabinin K.D., Serebryanyi A.N., Sputnikovyye nablyudeniya poverkhnostnykh proyavlenii vnutrennikh voln v Kaspiiskom more (Satellite observations of internal waves surface manifestations in the Caspian Sea), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011v, No. 2, pp. 40–48.
22. Lavrova O.Yu., Serebryanyi A.N., Mityagina M.I., Bocharova T.Yu., Podsputnikovyye nablyudeniya melkomasshtabnykh gidrodinamicheskikh protsessov v severo-vostochnoi chasti Chernogo moray (Subsatellite observations of small-scale hydrodynamic processes in the northeastern Black Sea), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 308–322.
23. Lavrova O.Yu., Krayushkin E.V., Solov'ev D.M., Golenko M.N., Golenko N.N., Kalashnikova N.A., Demidov A.N., Vliyanie vetrovogo vozdeistviya i gidrodinamicheskikh protsessov na rasprostranenie vod Kaliningradskogo zaliva v akvatorii Baltiiskogo moray (Influence of wind and hydrodynamic processes on propagation of the Vistula Lagoon waters into the Baltic Sea), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 76–99.
24. LeBlond P., Mysak L., *Volny v okeane* (Waves in the ocean), Moscow: Mir, 1981, Vol. 1, 480 p.
25. Leonov A.I., Miropol'skii Yu.Z., O rezonansnom vozbuzhdenii vnutrennikh gravitatsionnykh voln v okeane kolebaniyami atmosfernogo davleniya (On resonant excitation of internal gravity waves in ocean by atmospheric pressure oscillations), *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1977, Vol. 9, No. 8, pp. 851–862.
26. Mityagina M.I., Lavrova O.Yu., Sputnikovyye nablyudeniya vikhrevykh i volnovykh protsessov v pribrezhnoi zone severo-vostochnoi chasti Chernogo moray (Satellite observations of eddy and wave processes in the coastal waters of the northeastern Black Sea), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 5, pp. 72–79.
27. Mityagina M.I., Lavrova O.Yu., Sputnikovyye nablyudeniya poverkhnostnykh proyavlenii vnutrennikh voln v moryakh bez prilivov (Radar survey of internal waves surface manifestations in non-tidal seas), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*, Vol. 7, No. 1, 2010, pp. 260–272.
28. Raev M.D., Sharkov E.A., Issledovaniya okruzhayushchei sredy radiofizicheskimi metodami. Istoriya sozdaniya i stanovlenie napravleniya «Radiofizicheskie sputnikovyye issledovaniya Zemli» (Environmental studies by radiophysical methods. Creation and history of science direction "Radiophysical satellite investigations of the Earth"), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 33–52.

29. Sabinin K.D., Lavrova O.Yu., Kol'chatye struktury na sputnikovykh izobrazheniyakh i veroyatnaya prichina ikh obrazovaniya (fenomenologicheskaya model') (Corrugated-pipe-like structures on satellite images of the sea surface and phenomenological model of their origin), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 93–101.
30. Serebryanyi A.N., Effekty nelineinosti vo vnutrennikh volnakh na shel'fe (Effects of non-linearity in the internal waves on the shelf), *Izvestiya AN. Fizika atmosfery i okeana*, 1990, Vol. 26, No. 3, pp. 285–293.
31. Serebryanyi A.N., Proyavlenie svoystv solitonov vo vnutrennikh volnakh na shel'fe (The manifestation of the properties of soliton in the internal waves on the shelf), *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 1993, Vol. 29, No. 2, pp. 244–252.
32. Serebryanyi A.N., Lavrova O.Yu. Antitsiklonicheskii vikhr' na shel'fe severo-vostochnoi chasti Chernogo morya: sovместnyi analiz kosmicheskikh snimkov i dannykh akusticheskogo zondirovaniya tolshchi moray (Anticyclonic eddy on the northeastern Black Sea shore: joint analysis of satellite images and data of acoustic sounding), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 5, No. 2, pp. 206–215.
33. Batchelor G.K., *An introduction to fluid dynamics*, Cambridge University Press, 2000, 615 p.
34. Dreschler-Fischer L., Lavrova O., Seppke B., Gade M., Bocharova T., Serebryanyi A. and Bestmann O., Detecting and tracking small scale eddies in the Black sea and the Baltic sea using high-resolution RADARSAT-2 and TERRASAR-X imagery (DTEDDIE), *Proceedings of International Geoscience Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2014*, Québec City, Canada, 13–18 July 2014, pp. 1214–1217.
35. Eldevik T., Dysthe K.B., Spiral eddies, *Journal of Physical Oceanography*, 2002, Vol. 32, No. 3, pp. 851–869.
36. Ivanova Yu., Ginzburg A.I., Oceanic eddies in synthetic aperture radar images, *Proc. Indian Academy of Sciences. (Earth Planet. Sci.)*, 2002, Vol. 111 (3), pp. 281–295.
37. Jackson C.R., Apel J.R., An atlas of internal solitary-like waves and their properties, *Global Ocean Associates*, 2002.
38. Kao T.W., Pao H.P., Park G., Surface intrusions, fronts and internal waves: a numerical study, *Journal of Geophysical Research*, 1978, Vol. 83, No. C9, pp. 4641–4650.
39. Lavrova O.Yu., Bocharova T.Yu., Sabinin K.D., SAR observations of dynamic processes in the Bering Strait, *Atmospheric and Oceanic Processes, Dynamics, and Climate Change* (Eds. Zhaobo Sun), 2003, Vol. 4899, pp. 28–35.
40. Lavrova O.Yu., Krayushkin E.V., Golenko N.N., Golenko M.N., Investigation of mechanisms of generation, development and evolution of vortex structures in the northeastern part of the Black Sea and in the southeastern part of the Baltic Sea, *Proc. of SPIE. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*, 9638–24.
41. Lavrova, O., Mityagina M., Bocharova T., and Gade M., Multisensor observation of eddies and mesoscale features in coastal zones, *Remote Sensing of the European Seas*, (Barale, Vittorio; Gade, Martin Eds.), Springer, 2008, pp. 463–474.
42. Lavrova O. Yu., Sabinin K.D., Mityagina M.I., Ship wake distortion as indicator of spatial current fine structure, *Proc. 4th International Workshop Sea SAR 2012. 18-22 June 2012. Tromsø, Norway, ESA*, 2012, Vol. ESA-SP-709, ESA Publications Division, European Space Agency, Noordwijk, The Netherlands.
43. Lavrova, O., Sabinin K., Mityagina M., Bocharova T., Internal waves in the Scagerrak Strait, *Book of Abstracts IEEE/OES Baltic Symposium 2014*, May 26 – 29, 2014, Tallinn, Estonia, p.66.
44. Lavrova O., Serebryanyi A., Bocharova T. and 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; doi:10.1117/12.970482.
45. Lavrova O., Serebryanyi A., Bocharova T., Investigation of small scale hydrodynamic processes using high resolution SAR imagery and ADCP data, *ESA-SP-722*, 2013, ESA Publications Division, European Space Agency, Noordwijk, The Netherlands, 8 p.
46. 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, Vol. 31, No. 17, pp. 4779–4790.
47. Munk W., Armi L., Fisher K., Zachariasen F., Spirals on the sea, *Proc. Roy. Soc.* 2000, 456A, pp. 1217–1280.
48. Nash J.D., Moum J.N., River plumes as a source of large-amplitude internal waves in the coastal ocean, *Nature*, 2005, 437, pp. 400–403.
49. Pan J., Jay D.A., Orton P.M., Analyses of internal solitary waves generated at the Columbia River plume front using SAR imagery, *Journal of Geophysical Research*, 2007, Vol. 112, C07014, doi:10.1029/2006JC003688.
50. Roach A.T., Aagaard K., Pease C.H., Salo S. A., Weingartner T., Pavlov V., Kulakov M., Direct measurements of transport and water properties through the Bering Strait, *Journal of Geophysical Research*, 1995, Vol. 100, No. C9, pp.18443–18457.
51. Scully-Power P., Navy Oceanographer Shuttle Observations, STS 41–G, Mission Report, *Naval Underwater Systems Center Tech. Rep. NUSC TD 7611*, 1986, 71 p.
52. Stashchuk N., Vlasenko V. Generation of internal waves by a supercritical stratified plume, *J. Geophysical Research*, 2009, Vol. 114, C01004, doi: 10.1029/2008JC004851.