Вихревые структуры и волновые процессы в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря, выявленные в ходе спутникового мониторинга

М.И. Митягина, О.Ю. Лаврова

Институт космических исследований РАН 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32 E-mail: <u>mityag@iki.rssi.ru</u>

В работе обобщаются результаты комплексного спутникового мониторинга северо-восточной части акваторий Черного моря. Мониторинг основывался на анализе радиолокационных данных высокого разрешения, получаемых с помощью ASAR Envisat и ERS-2 SAR, а также данных сенсоров MODIS Aqua/Terra и AVHRR NOAA в оптическом и инфракрасном диапазонах. Совокупность данных дистанционного зондирования использовались совместно для выявления особенностей прибрежной циркуляции вод, пространственно-временных характеристик вихревых структур и волновых процессов в прибрежной зоне. Особое внимание уделено исследованию формирования, развития и перемещения вихрей малого масштаба (до 10 км) и сезонной изменчивости их проявления. Обсуждаются случаи проявления в северо-восточной части Черного моря внутренних волн неприливной природы, выявленные по данным спутниковой радиолокации в окрестности вихревых структур. Сделаны предположения о возможных механизмах их генерации.

Основные элементы циркуляции Черного моря

Главным элементом циркуляции вод Черного моря является Основное черноморское течение (ОЧТ). Это направленное против часовой стрелки течение охватывает все море по его периферии и характеризуется высокой гидродинамической нестабильностью [1, 2], которая под влиянием синоптической изменчивости ветра и особенностей рельефа дна приводит к меандрированию ОЧТ и образованию циклонических и антициклонических вихрей с обеих сторон основного стержня. В данных спутникового дистанционного зондирования оптического и инфракрасного диапазонов основная струя ОЧТ может быть различима в зимние и весенние месяцы, тогда как в летний период вихревая активность столь высока, что практически полностью маскирует ОЧТ, которое может быть определено только как некая усредненная траектория движения мезомасштабных вихревых структур.

На рис. 1 представлены карты ТМП, восстановленные на основе данных сенсора *MODIS* ИСЗ *Aqua* для холодного и теплого сезонов. Темная линия схематично отображает усредненное положение основного стержня ОЧТ. На картах также хорошо различимы мезомасштабные вихревые структуры разных знаков.

Спутниковые наблюдения вихревой активности в северо-восточной части акватории Черного моря традиционно проводились при помощи сенсоров оптического и ИК диапазонов. На основе оптических и ИК данных оценивались пространственные размеры вихревых структур, и с помощью серии изображений прослеживалось их распространение и время жизни [3, 4]. Было показано [5], что между стержнем ОЧТ и берегом существует зона антициклонической завихренности поля течений. Здесь формируются прибрежные антициклонические вихри (ПАВ). Формированию ПАВ способствует гидродинамическая неустойчивость ОЧТ, проявлением которой является его меандрирование. В экологическом аспекте ПАВ, обладая свойством конвергентности, являются своеобразным аккумулятором загрязненных прибрежных вод, способствуя их самоочищению. Разрешающая способность изображений, получаемых при помощи сенсоров Aqua/Terra MODIS и NOAA AVHRR, позволяет изучать мезомасштабные вихревые структуры с диаметрами более 30 км при отсутствии облачного покрова.



Рис. 1. Поле поверхностной температуры, восстановленное из данных MODIS Aqua для холодного (a) и для теплого (б) сезонов

Прибрежные вихри малого масштаба

Проведение регулярных спутниковых радиолокационных наблюдений морской поверхности в северо-восточной части акватории Черного моря [6] позволило выявить наличие вихревых структур значительно меньших масштабов, чем ПАВ, описанные в предыдущем разделе. Вследствие их небольших размеров эти вихри невозможно обнаружить с помощью спутниковых оптических и ИК сенсоров [7]. Наше исследование вихрей малых масштабов базировалось на данных радиолокатора с синтезированной апертурой (SAR) ИСЗ ERS-2 и усовершенствованного радиолокатора с синтезированной апертурой (ASAR) ИСЗ Envisat, пространственное разрешение которых достигает 25 метров.

Анализ полученных данных показал, что на радиолокационных изображениях морской поверхности 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, и в подавляющем большинстве случаев являются циклоническими по направлению вращения.

На радиолокационных изображениях данные вихри визуализируются благодаря сликовым полосам, образованным пленками поверхностно-активных веществ естественного происхождения, постоянно присутствующим на морской поверхности, особенно в теплое время года. Источники происхождения этих органических пленок пространственно распределены по поверхности и моменты их возникновения распределены во времени. Эти 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 естественного происхождения как бы «прорисовывают» вихри на радиолокационных изображениях, преимущественно в условиях слабого и умеренного приповерхностного ветра [8, 9]. Благодаря присутствию на поверхности пленок поверхностно активных веществ, средства радиолокации позволяют регистрировать вихревые структуры малых размеров. Пример радиолокационного изображения спиралеобразного циклонического вихря в прибрежной зоне представлен на рис. 2. Радиолокационное изображение выявляет тонкую структуру вихря, поэтому появляется возможность оценить долю пленок биогенного происхождения, вовлеченных в вихревую структуру в целом и сконцентрированных в зонах конвергенции.



Рис. 2. Фрагмент Envisat ASAR изображения, полученного 10.05.2007 в 07:36:59 UTC. Циклонический вихрь с диаметром 25 км

Сезонная изменчивость проявления вихрей малого масштаба

В 2006–2007 гг. Лаборатория аэрокосмической радиолокации Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) принимала участие в спутниковом мониторинге состояния вод прибрежной полосы российского сектора Азовского и Черного морей, обеспечивая прием, обработку и интерпретацию радиолокационных данных [10]. В периоды с апреля по октябрь принимались и обрабатывались радиолокационные изображения высокого разрешения сенсора ASAR со всех пролетов спутника ENVISAT над акваторией северо-восточной части Черного моря (периодичность пролетов составляет 12-72 часа). Большой объем данных позволил провести определенные обобщения и получить некоторые статистические результаты о возникновении и развитии мелко масштабных вихревых структур в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря.

Каждое радиолокационное изображение подвергалось визуальному анализу с целью обнаружения на нем структур, с определенностью принадлежащих к классу спиральных вихрей малых размеров [11]. Для каждой такой вихревой структуры определялся ее диаметр, координаты центра и направление вращения. Все данные о вихрях сводились в таблицу. В качестве диаметра вихря мы рассматривали среднее геометрическое длин его малой и большой осей (см. рис. 2), проведенных через центр.

По окончании работ по мониторингу все выявленные вихри в прибрежной зоне были нанесены на карту, представленную на рис. 3. Оказалось, что нанесенные на карту точки естественным образом распались на два непересекающихся множества, на рисунке соответственно отмеченные малиновым и зеленым цветом. Вихри, помеченные зеленым цветом, соответствуют данным, полученным в относительно холодный сезон – до середины мая и после середины сентября. Малиновым цветом помечены точки, соответствующие данным, полученным в теплый летний период. Кривая, разделяющая эти два множества, совпадает с усредненным положением основной струи ОЧТ (точечная линия). Видно, что в теплый период вихревые структуры малых масштабов возникают и распространяются в области между основной струей ОЧТ и береговой чертой, тогда как в холодный период мелкомасштабные вихри располагаются мористее основной струи ОЧТ.



Рис. 3. Обобщенная карта схема распределения вихревых структур, выявленных по данным спутниковой радиолокации в северо-восточном секторе Черного моря

Все вышесказанное подводит к выводу о наличии сезонной изменчивости вихревых движений в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря. Проанализируем основные отличительные особенности развития и проявления мелкомасштабной вихревой активности в прибрежной зоне для теплого и холодного сезонов, выявленные на основе совместного анализа данных спутниковых радиолокаторов, оптических и ИК сенсоров.

В теплый сезон на радиолокационных изображениях детектируются изолированные вихри малых размеров, с диаметрами 2-6 км, расположенные в непосредственной близости от береговой

черты и отличающиеся непродолжительными временами жизни. Примеры мелкомасштабных вихрей, выявляемых на радиолокационных изображениях морской поверхности в летний период, представлены на рис. 4.



Рис. 4. Фрагменты (15 км × 20 км) Envisat ASAR изображений, отображающие спиралевидные мелкомасштабные вихри характерные для теплого сезона: а) Два циклонических вихря с диаметрами 3.75 км (А) и 3 км(В); б) Циклонический вихрь с диаметром 3.5 (С) км; в) Циклонический вихрь с диаметром 2.5 (D) км; г) Циклонический вихрь с диаметром 5.3 (E) км

Эти вихри являются преимущественно циклоническими по знаку вращения квазидвумерными структурами, осуществляющими перемешивание в горизонтальной плоскости. Есть основания полагать, что для образования вихрей небольших масштабов воздействие ветра (прямое и опосредованное) является определяющим. Вихри этого типа детектируются только на радиолокационных изображениях морской поверхности и вследствие своих небольших размеров неразличимы на изображениях оптических и ИК сенсоров. В качестве примера на рис. 5 приведены фрагменты радиолокационного изображения морской поверхности и поля поверхностных температур, восстановленного на основе данных сенсора AVHRR ИСЗ NOAA-17.

На радиолокационных изображениях морской поверхности, полученных в холодный сезон, выявляются вихревые структуры с индивидуальными размерами 4-30 км, имеющие тенденцию объединяться в совокупность вихрей – вихревые кластеры. Скопления вихрей обнаруживаются на расстояниях свыше 30 км от береговой черты вблизи внутренней границы ОЧТ. Примеры вихревых структур, выявляемых на радиолокационных изображениях морской поверхности в холодный период, представлены на рис. 6.



Рис. 5. Фрагмент (110 км × 200 км) Envisat ASAR изображения, отображающий поверхностные проявления скопления вихрей малого масштаба. Отчетливо видны циклонические вихри с диаметрами 22,5 км (А) и 25 км (В)

Вихревые кластеры могут содержать вихри как циклонической, так и антициклонической направленности, которые имеют более продолжительное время жизни по сравнению с вихрями «теплого» сезона и вызывают не только горизонтальное, но и вертикальное перемешивание вод. Вихри этого типа образуются под влиянием меандрирования течения или при разрушении крупномасштабных вихревых структур. Вихревые кластеры могут проявляться в данных оптических и ИК сенсоров, однако только радиолокационные данные позволяют идентифицировать индивидуальные вихри и выявлять их тонкую структуру. Для иллюстрации на рис. 7 приведены фрагменты радиолокационного и оптического изображений морской поверхности, полученные в близкие моменты времени.



Рис. 6. а) ASAR Envisat изображение, полученное 19.06.2006 в 07:52 UTC. б) ASAR Envisat изображение, полученное 19.06.2006 в 19:10 UTC. в) Карта-схема перемещения вихревого диполя. Рассчитанная скорость перемещения циклонической составляющей диполя составляет 0,05-0,1 м/с в северо-восточном направлении, антициклонической – 0,2-0,3 м/с в юго-восточном направлении. г) Поле поверхностной температуры, восстановленное из данных AVHRR NOAA от 20.06.2006 03:20 UTC.
д) Карта WLR, восстановленная из данных MODIS Aqua от 20.06.2006 11:10 UTC. е) Поверхностные проявления морских внутренних волн неприливного происхождения в непосредственной близости от холодной части вихревого диполя



Рис. 7. Поле поверхностных температур по данным NOAA AVHRR (слева). Фрагмент Envisat ASAR изображения (справа вверху).

Увеличенный фрагмент Envisat ASAR изображения, отображающий поверхностные проявления внутренних волн в море (справа внизу)

Вихревые диполи

Особого рассмотрения заслуживает еще один класс вихревых структур, детектируемых на радиолокационных изображениях морской поверхности. Речь идет о вихревых диполях или грибовидных течениях, представляющих собой квазисимметричные пространственные структуры, являющиеся комбинацией узкой струи с парой вихрей противоположного знака на конце, так что структура в целом напоминает гриб в разрезе [12]. На радиолокационных изображениях морской поверхности грибовидные течения визуализируются благодаря сликам поверхностно-активных веществ естественного происхождения, концентрирующимся в зонах конвергенции. Динамические структуры этого типа регулярно наблюдаются на спутниковых изображениях северовосточной части Черного моря [13, 14]. Они вызывают не только горизонтальное, но и вертикальное перемешивание вод, осуществляя перенос между более глубокими водами открытого моря и прибрежной зоной, а также приводят к возрастанию гидродинамической неустойчивости вдольбереговых течений. Размеры вихревых диполей варьируются от десятков до сотен километров. Возникновение и развитие вихревых диполей не подвержено сезонной изменчивости. Хорошо развитые вихревые диполи при отсутствии облачности проявляются в данных оптических и ИК сенсоров, однако привлечение данных спутниковой радиолокации морской поверхности позволяет наблюдать ранние степени формирования и развития вихревых диполей еще до того, как они проявятся в оптических и ИК изображениях, а также детально выявить структуру поверхностных течений, обусловленных диполем. В качестве иллюстрации может быть рассмотрен следующий пример.

19.06.06 над районом интереса радиолокационные съемки были проведены с одиннадцатичасовым интервалом. Утреннее РЛИ (рис. 6а) получено с в условиях слабого южного ветра 2-4 м/с и характеризуется обширными областями штиля и насыщенностью нитевидными сликами, связанными с поверхностно-активными веществами биогенного происхождения. Слики очерчивают большой грибовидный вихрь – вихревой диполь. Линейные размеры диполя составляют 66 км (ширина) на 62 км (длина). Примерные координаты центра 37°20'E, 44°15'N. Вечернее РЛИ (рис. 6б) получено в условиях слабого, 1-3 м/с, восточного, северо-восточного ветра. Грибовидный вихрь, выявленный на утреннем снимке, заметно вырос в размерах до 92 км (ширина) на 78км (длина), а его ось совершила поворот по часовой стрелке примерно на 20 градусов. На ИКизображениях AVHRR ИСЗ серии NOAA и на цветосинтезированных изображениях аппаратуры *MODIS* ИСЗ *Аqua*, полученных в тот же день, 19.06.06, этот диполь был слабо различим, однако более отчетливо проявился на следующие сутки – 20.06.06 (рис. 8г, д).

Грибовидные структуры, совпадающие по форме со структурами, выявленными на радиолокационных изображениях, отчетливо выделяются в полях поверхностной температур и замутненности вод.

Поверхностные проявления внутренних волн неприливного происхождения, выявленные по данным спутниковой радиолокации

Теоретическим и экспериментальным исследованиям внутренних волн в океанах и морях, механизмов их возникновения, развития, распространения и разрушения посвящены сотни публикаций, при этом их поток не обнаруживает тенденцию к уменьшению. Дистанционные методы широко используются для изучения внутренних гравитационных волн в океане, однако основным объектом наблюдения являются приливные внутренние волны, генерация которых на материковом склоне связана с приливо-отливными течениями и внутренними приливами в шельфовой зоне.

Подавляющая часть экспериментальных данных по внутренним волнам в бесприливном Черном море получена с помощью контактных методов, когда прибор погружается в воду и дает сведения о том, что делается вокруг него [15, 16]. Сведения о наблюдении внутренних волн в Черном море методами дистанционного зондирования практически отсутствуют.

Во время проведения работ по спутниковому мониторингу состояния и загрязнения вод прибрежной полосы российского сектора Азовского и Черного морей в 2006-2007 гг. нами было идентифицировано 8 случаев поверхностных проявлений цугов внутренних волн на радиолокационных изображениях морской поверхности.

Результаты совместного анализа данных спутниковой радиолокации и данных оптических и ИК сенсоров, полученных в близкие моменты времени, свидетельствуют о том, что все зарегистрированные поверхностные проявления внутренних волн локализуются вблизи границы холодного вихря или холодного гидрологического фронта. В частности, на рис. 6е приведен фрагмент радиолокационного изображения, отображающий поверхностные проявления пакета внутренних волн вблизи границы антициклонической части вихревого диполя. Пакет состоит из 6 волн, средняя длина волны составляет 175 м.

На рис. 7 представлены фрагменты Envisat ASAR изображения и фрагмент поля поверхностных температур, восстановленного из данных сенсора NOAA AVHRR, полученные в близкие моменты времени. На карте температур морской поверхности отчетливо различим крупномасштабный вихрь в стадии разрушения (рис. 7а). Максимальные температурные контрасты примерно соответствуют зонам конвергенции, которые посредством сликов прорисовывают ту же вихревую структуру на радиолокационном изображении (рис. 7б). Вблизи области максимального контраста на РЛИ детектируется пакет внутренних волн (рис. 7в), состоящий примерно из 20 волн, средняя длина которых составляет 140 м. Внутренние волны распространяются в сторону открытого моря под углом к береговой черте, при этом их фронты параллельны центральной струе диполя. Осцилляции центральной струи диполя являются наиболее вероятным источником генерации данного пакета внутренних волн.

Заключение

Проведенный анализ многочисленных экспериментальных данных позволил выявить особенности и закономерности прибрежной циркуляции в северо-восточной части Черного моря.

В частности, по данным спутниковой радиолокации выявлено, что в периоды ослабления ОЧТ в прибрежной зоне наблюдается множество мелких спиралевидных преимущественно циклонических вихрей с размерами зачастую не превосходящими 10 км и временем жизни от нескольких часов до нескольких суток. Суммарный вклад этих вихрей в перенос загрязняющих веществ и очищение вод соизмерим с вкладом, вносимым ОЧТ и крупными прибрежными антициклоническими вихрями. Предположительно, их возникновение связано с наличием сдвигов скорости на периферии прибрежного вдольберегового течения и ветровым воздействием.

На радиолокационных изображениях были обнаружены поверхностные проявления морских внутренних волн неприливного происхождения. Совместный анализ данных спутниковой радиолокации и данных спутниковых сенсоров ИК и оптического диапазона позволил определить возможные факторы, приводящие к генерации наблюдаемых внутренних волн.

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 08-05-00831-а и 07-07-13535-офи_ц), а также международного проекта INTAS 06-1000025-9091. Спутниковые радиолокационные данные предоставлены Европейским космическим агентством (ЕКА) в рамках проектов C1P.1027 и Bear 2775.

Литература

1. *Stanev E.* Understanding Black Sea dynamics. An Overview of Recent Numerical Modeling // Oceanography, 2005. Vol. 18. No 2. P. 56-75.

2. *Korotaev*, *G. K.*, *T. Oguz*, and *S. Riser C*. Intermediate and deep currents of the Black Sea obtained from autonomous profiling floats // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2006. Vol. 53. No 17-19. P. 1901-1910.

3. Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Костяной А.Г. и др. Антициклонические вихри в глубоководной восточной части Черного моря летом–осенью 1999 г. (спутниковые и судовые измерения) // Исследование Земли из космоса, 2001. № 5. С. 3–11.

4. Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Пиотух В.Б. Мезомасштабная динамика вод Черного моря // Океанология на старте 21 века. М.: Наука, 2008. С. 10–30.

5. Овчинников И.М., Титов В.Б. Антициклоническая завихренность течений в прибрежной зоне Черного моря // Докл. АН СССР, 1990. Т. 314. № 5. С. 1236–1239.

6. Булатов М.Г., Ю.А. Кравцов, А.В. Кузьмин, О.Ю. Лаврова, М.И. Митягина, М.Д. Раев, Е.И. Скворцов, Микроволновые исследования морской поверхности в прибрежной зоне (Геленджик, 1999-2002) // М.: Книжный дом "Университет", 2004. 135 с.

7. Lavrova, O., M. Mityagina, T. Bocharova, and M. Gade. Multisensor observation of eddies and mesoscale features in coastal zones // Remote Sensing of the European Seas. Springer. 2008. 514 p.

8. *Alpers W, Hühnerfuss H*. The damping of ocean waves by surface films: A new look at an old problem // Journal of Geophys Research, 1989. Vol. 94. No C5. P. 6251-6265.

9. Лаврова О.Ю. Слики как индикаторы вихревой активности в прибрежной зоне. // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. Сборник научных статей. М.: «GRANP Polygraph», 2005. Т.2. С.118-123.

10. Кровотынцев В.А., О.Ю. Лаврова, М.И. Митягина, А.Г. Островский. Космический мониторинг состояния природной среды Азово-Черноморского бассейна // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. М.: «Азбука-2000», 2007. Выпуск 4. Том 1. С.295-303.

11. DiGiacomo P.M., Holt B. Satellite observations of small coastal ocean eddies in the Southern California Bight // Journal of Geophysical Research, 2001. Vol. 106, No C10. P. 22,521-22,543.

12. Федоров К.Н. и Гинзбург А.И. Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 303 с.

13. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Krivosheya V.G., Nezlin N.P., Soloviev D.M., Stanichny S.V., Yakubenko V.G. Meso-scale eddies and related processes in the northeastern Black Sea // Journal of Marine System, 2002. Vol. 32. P. 71–90.

14. Afanasyev Y.D., A.G. Kostianoy, A.G. Zatsepin, and P.-M. Poulain. Analysis of velocity field in the eastern Black Sea from satellite data during the Black Sea '99 experiment // Journal of Geophys. Res., 2002. Vol. 107. No.C8. P. 3098-3109.

15. Иванов В.А., Серебряный А.Н. Короткопериодные внутренние волны в прибрежной зоне бесприливного моря // Изв. АН СССР, 1985. Физика атмосферы и океана. Т.21. №6. С. 648–656.

16. 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.