

Вихревые течения в Черном море

С.С. Каримова

*Институт космических исследований РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mail: feba@list.ru*

В статье приведены результаты анализа спутниковых изображений, полученных с помощью радиометров AVHRR NOAA и MODIS AQUA в инфракрасном и видимом диапазонах спектра. В результате проведенного анализа уточнены сведения о вихревых элементах поверхностной циркуляции черноморских вод как квазистационарной (меандры, ринги, прибрежные антициклонические вихри), так и нестационарной (вихри, образующиеся из-за неоднородности береговой линии; вихревые цепочки и грибовидные течения) природы. Установлено, что прибрежная часть акватории, охваченная Основным черноморским течением, по всему периметру моря является областью повышенной гидродинамической неустойчивости, но при этом вдоль западного и восточного побережий активность нестационарных вихревых движений проявляется преимущественно в виде грибовидных течений, а вдоль северного и южного – в виде вихревых цепочек.

Введение

Особенности циркуляции поверхностных вод Черного моря и, в частности, вихревые элементы этой циркуляции относятся к разряду довольно хорошо изученных вопросов. В результате проведенных гидрологических исследований и разработки ряда численных моделей сложилась общепринятая, классическая картина образования вихревых структур в Черном море. Так, одним из основных источников вихреобразования в прибрежной зоне считается гидродинамическая неустойчивость Основного черноморского течения (ОЧТ), проявляющаяся в его меандрировании, образовании замкнутых кольцевых течений (рингов) с возможной последующей их трансформацией в вихри открытого моря [1]. Анализ межсезонных изменений ОЧТ показал, что усиленная мезомасштабная динамика и продуцируемый ею поперечный к берегу водообмен наблюдается летом в периоды ослабления ОЧТ [2].

Определенные районы прибрежной акватории Черного моря вследствие сочетания особенностей батиметрии и очертаний береговой линии настолько благоприятны для образования мезомасштабных вихрей, что последние наблюдаются там практически постоянно (так называемые квазистационарные вихри), и некоторые из них получили собственные имена (Кавказский, Батумский, Севастопольский и пр.) [3-5].

Другим, в некоторой степени эндемичным для Черного моря типом вихрей являются прибрежные антициклонические вихри (ПАВ), которые образуются в так называемой прибрежной зоне конвергенции между стрежнем ОЧТ и берегом [6-9].

Большой вклад в изучение крупно- и мезомасштабных вихревых течений вносят дрейфтерные эксперименты. В частности, траектории дрейфтеров подтвердили наличие в Черном море общего циклонического переноса вод с ОЧТ (хотя не очертили ни восточный, ни западный макромасштабный циклонический круговорот), а также наличие интенсивных мезомасштабных вихрей как в прибрежной, так и в центральной частях Черного моря [10].

Значительно хуже изучены особенности нестационарных вихревых образований, характерных для акватории Черного моря. К этому типу вихрей, в соответствии с [11], относятся вихревые цепочки; одиночные спиралевидные вихри; вихри, образующиеся вследствие неоднородности береговой линии; грибовидные течения и пр. В последнее время вихри этой категории, образующиеся в прибрежных водах российского сектора Черного моря, успешно изучаются с помощью данных спутниковой радиолокации, а также с применением мультисенсорного подхода [12-13].

В представленной работе на основе данных дистанционного зондирования инфракрасного и видимого диапазонов спектра был проведен анализ вихревых элементов поверхностной циркуляции черноморских вод как квазистационарной, так и нестационарной природы. К первым отно-

сятся ПАВ и кольцевые течения (ринги), а ко вторым – вихри, образующиеся из-за неоднородности береговой линии; вихревые цепочки и грибовидные течения.

Данные и методика

В работе анализировались спутниковые изображения для акватории Черного моря, отражающие распределение следующих величин:

- температура поверхности моря (ТПМ), радиометры MODIS Aqua и AVHRR NOAA за период 09.2004-12.2007;
- нормализованная яркость восходящего излучения (MODIS Aqua, 551 нм) за период 04.2006-12.2007;
- концентрация хлорофилла *a* (MODIS Aqua) за период 04.2006-12.2007.

Как известно, спутниковые изображения, полученные в инфракрасном диапазоне, могут с успехом применяться для изучения мезомасштабной циркуляции поверхностных вод океана (см., например, [14, 15]). В качестве своеобразных трассеров движения вод в этом случае выступают контрасты температуры. На рис. 1 представлено распределение ТПМ, полученное по данным AVHRR, спутник NOAA-15, 23.10.2005 г. На данном изображении прослеживаются самые разнообразные вихревые элементы поверхностной циркуляции вод.

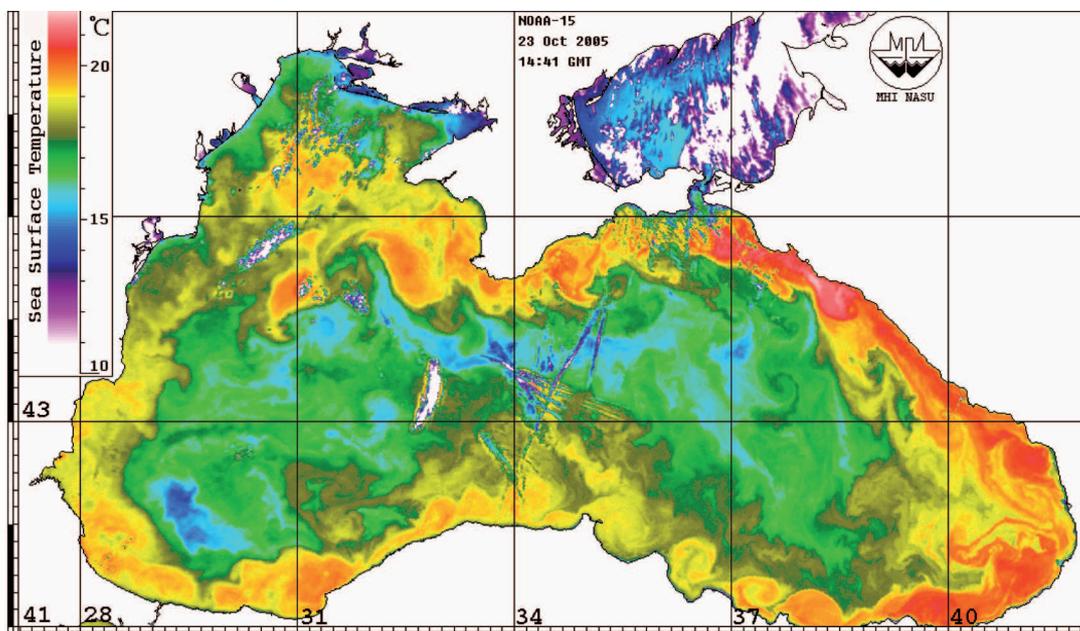


Рис. 1. Элементы поверхностной циркуляции вод в поле ТПМ. AVHRR NOAA-15. 23.10.2005. 14:41 UTC

Применение данных по концентрации хлорофилла *a* и нормализованной яркости восходящего излучения базируется на тех же принципах, что и для ТПМ, но необходимо отметить следующее. В поле температуры контрасты, достаточные для выделения отдельных элементов циркуляции вод, наблюдаются практически повсеместно и, следовательно, проследить траектории движения можно так же по всей акватории. В отличие от температуры, в поле концентрации хлорофилла *a* или нормализованной яркости восходящего излучения достаточные концентрации трассирующих частиц присутствуют далеко не всегда. Однако в тех случаях, когда они все же присутствуют, они хорошо визуализируют «безвихревую» составляющую элементов циркуляции, таких как струи, меандры, ринги пр. В данном случае также существенно, что благодаря повышенным концентрациям фитопланктона в прибрежных водах в поле концентрации хлорофилла *a* хорошо отобразились прибрежные антициклонические вихри, которые достаточно сложно обнаружить в поле иных параметров. В поле температуры, как правило, наилучшим образом проявляются нестационарные вихревые структуры, имеющие ярко выраженный спиралевидный характер.

Квазистационарные вихревые структуры

Самый крупномасштабный вихревой элемент циркуляции поверхностных вод Черного моря – это ОЧТ. К сожалению, достоверное выделение струи ОЧТ по спутниковым изображениям редко оказывается возможным. На рис. 2 представлены изображения, на которых отчетливо выделяется не только струя ОЧТ, но и антициклонические меандры этого течения.

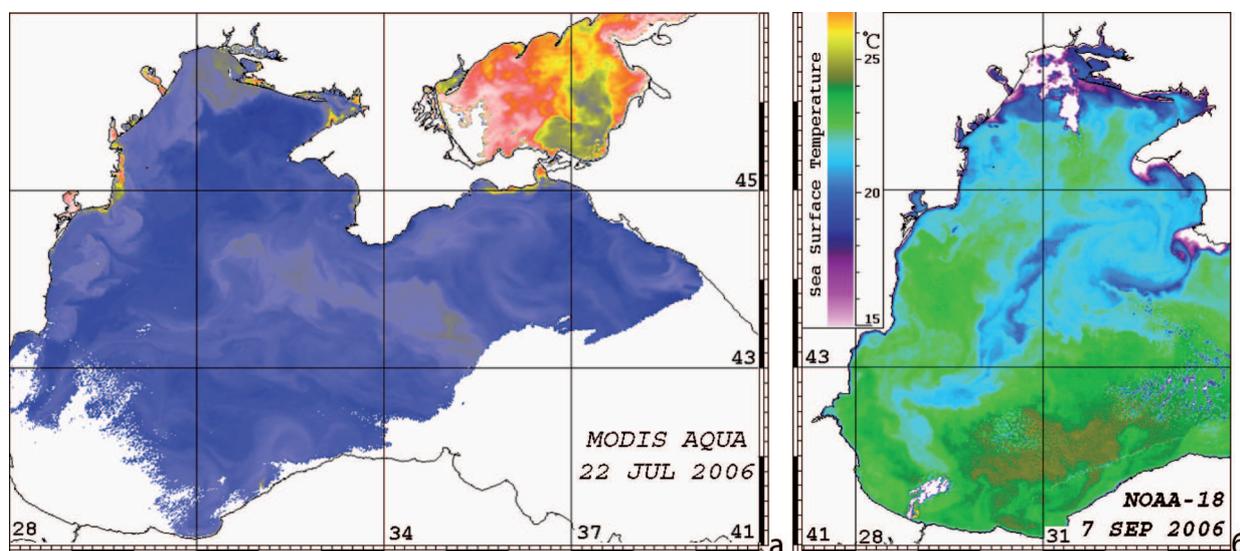


Рис. 2. Меандрирование ОЧТ по данным: а – MODIS AQUA от 22.07.2006 (нормализованная яркость восходящего излучения); б – AVHRR NOAA-18 от 7.09.2006

Другим важнейшим типом квазистационарных вихревых структур, так же связанным с ОЧТ, являются прибрежные антициклонические вихри. В результате проведенного анализа спутниковых изображений было установлено, что наиболее часто ПАВ наблюдаются у тех участков побережья, где минимальна ширина шельфа, т.е. вдоль южного и северо-восточного побережий; у западного берега это участок к югу от Варны, у северного – южное побережье Крыма.

Как правило, ПАВ имеют эллипсовидную форму с большой осью, примерно параллельной береговой линии. Величина продольного диаметра обнаруженных ПАВ варьирует от 30 до 120 км с медианным значением около 70 км. В работе [7] указываются значения этих параметров 28, 93 и 54 км соответственно.

С течением времени может происходить еще большее вытягивание вихря вдоль берега. На рис. 3 показана эволюция одного из ПАВ за период с 02.10.2006 по 06.10.2006; за это время его продольный диаметр увеличился с 60 до 120 км. Более подробную информацию об этом вихре, почерпнутую из контактных подспутниковых наблюдений, можно найти в [16].

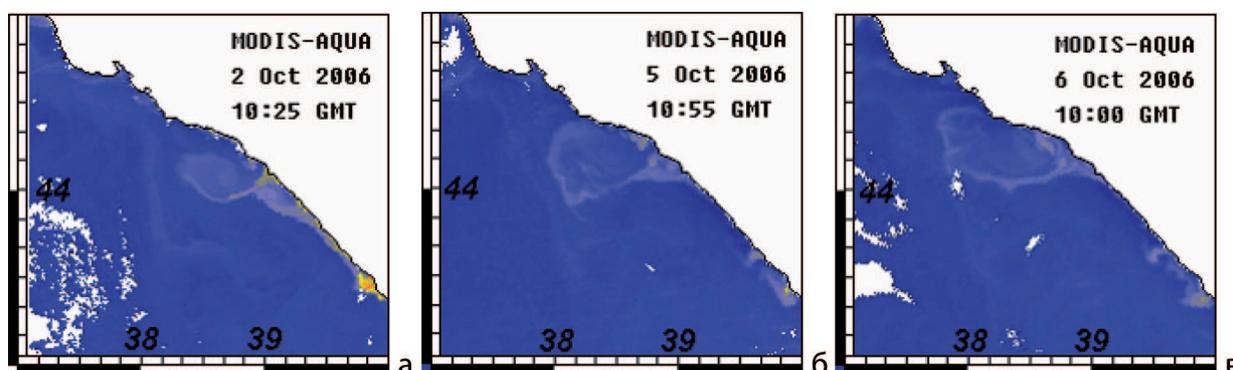


Рис. 3. Эволюция прибрежного антициклонического вихря по данным MODIS AQUA: а – 2.10.2006; б – 5.10.2006; в – 6.10.2006

Довольно часто ПАВ обнаруживаются не по одному, а парами; некоторые такие случаи приведены на рис. 4.

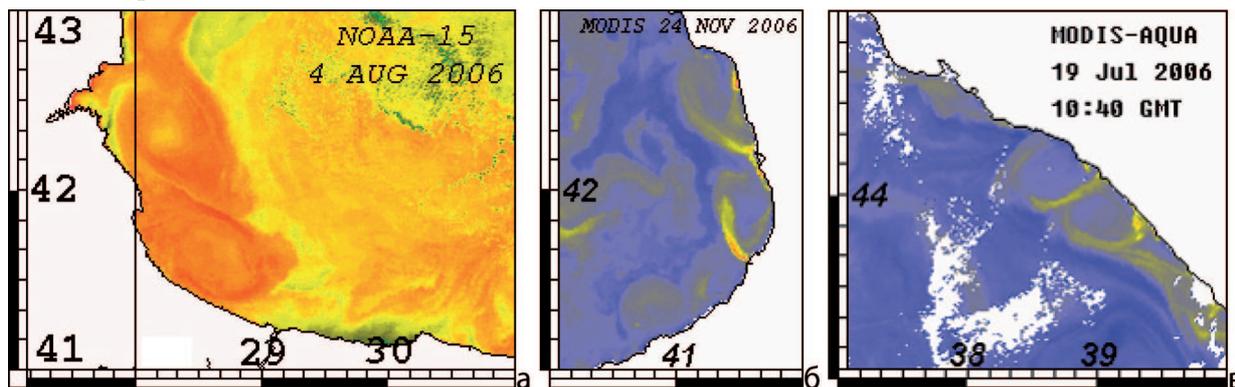


Рис. 4. Пары прибрежных антициклонических вихрей: а – AVHRR NOAA-15, 4.08.2006; б и в – MODIS AQUA (нормализованная яркость восходящего излучения), 24.11.2006 и 19.07.2006

Нестационарные вихревые структуры

Одной из самых совершенных форм проявления нестационарных вихревых структур являются вихревые цепочки. В соответствии со спутниковыми изображениями, наиболее часто цепочки вихрей наблюдаются по периметру моря над бровкой шельфа. Цепочки могут образовываться как циклоническими, так и антициклоническими вихрями; размер обнаруженных вихрей составляет от 20 до 90 км. Самые протяженные цепочки отмечены вдоль северного побережья моря, как, например, на изображении от 14.05.2005 (рис. 5а). Цепочки, подобные изображенной на этом рисунке, образуются в районе к югу от Керченского пролива квазипериодически и, как правило, составлены из антициклонических вихрей, но могут состоять и из циклонических (рис. 5б). Вихри, образующие цепочку, могут отстоять на значительное расстояние друг от друга. На рис. 5в показана цепочка, составленная из трех циклонических вихрей, протянувшаяся вдоль Кавказского побережья на 400 км.

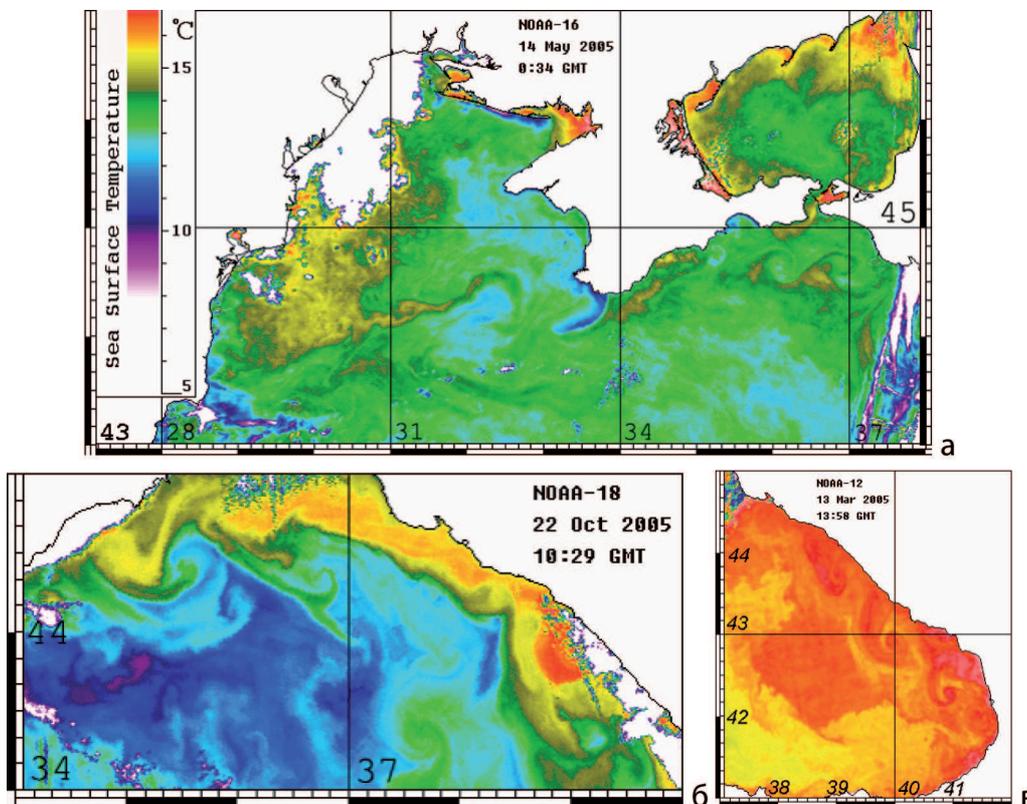


Рис. 5. Поля ТПМ, полученные по данным AVHRR NOAA: а – 14.05.2005; б – 22.10.2005; в – 13.03.2005

Типом вихревых структур, промежуточным между ПАВ и нестационарными вихрями, являются вихри, образующиеся вдоль восточной половины южного побережья моря из-за неоднородности береговой линии. Как правило, здесь образуются антициклонические вихри округлой спиралевидной формы с диаметром около 80 км (см. рис. 1).

Еще одной широко распространенной формой нестационарных вихревых движений являются грибовидные течения. Наибольшее количество грибовидных течений образуется в двух районах акватории Черного моря. Первый из них расположен вдоль Кавказского побережья, а второй – по линии Евпатория – Бургас. Ориентация обнаруженных грибовидных течений самая разнообразная. Почти у всех из них ширина «шляпки» на 15-30% превышает длину «ножки», как, например, у грибовидного течения, представленного на рис. 6а. Линейные размеры этих структур варьируют от 60 до 240 км. В 60% случаев антициклоническая часть по занимаемой площади и степени развития преобладает над циклонической, т.е. имеет место асимметрия вихревого диполя (рис. 6б). На этом рисунке также можно заметить, что антициклоническая часть «гриба» входит в состав антициклонической цепочки вихрей.

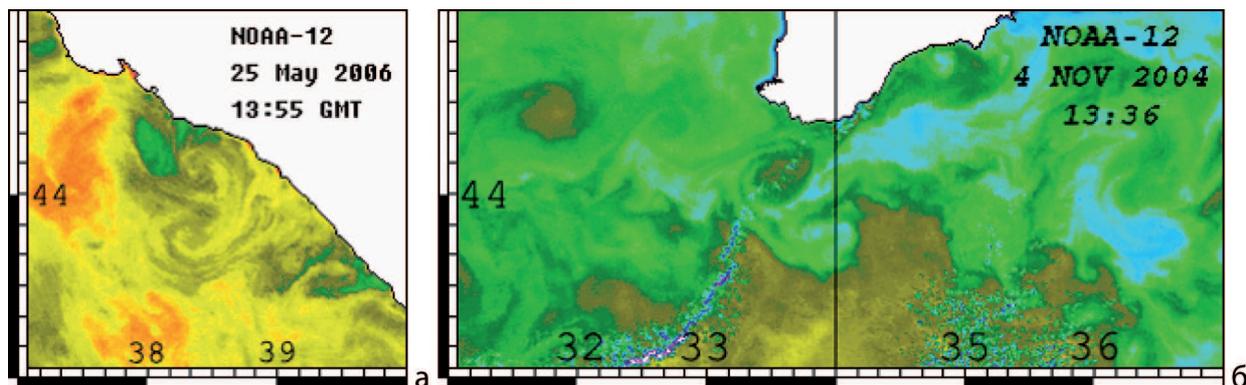


Рис. 6. Грибовидные течения в поле ТПМ (AVHRR NOAA): а – 25.05.2006; б – 4.11.2004

В некоторых случаях удается обнаружить компактную «упаковку» вихревых диполей. На рис. 7 показаны два изображения, полученные со спутников NOAA-15 и NOAA-16 с интервалом в 6,5 часов. На первом из них отчетливо выделяется грибовидное течение, «ножка» которого ориентирована с северо-запада на юго-восток (рис. 7а). Однако при взгляде на второе изображение можно заметить, что антициклоническая часть грибовидного течения с предыдущего изображения входит в состав другого грибовидного течения, ориентированного перпендикулярно к первому (рис. 7б).

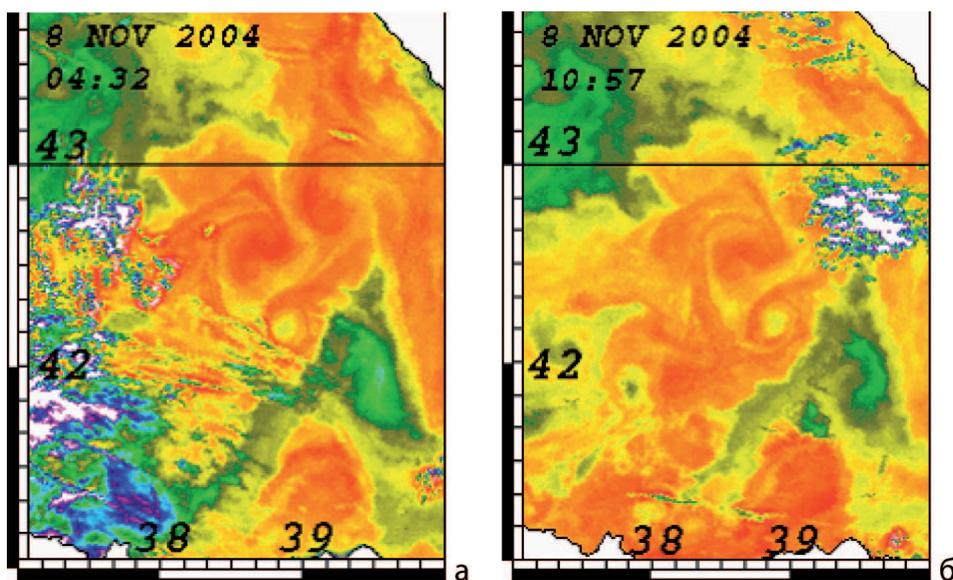


Рис. 7. Компактная «упаковка» грибовидных течений. AVHRR NOAA, 8.11.2004. а – 04:32 UTC; б – 10:57 UTC

Заключение

Как было наглядно продемонстрировано выше, изображения, полученные по данным радиометров AVHRR NOAA и MODIS TERRA/AQUA, могут нести важную информацию о вихревых структурах самого различного происхождения, при условии, что размер последних превышает 20 км. С помощью этих данных были уточнены статистические параметры некоторых типов вихрей. В частности, было показано, что

- продольный диаметр ПАВ может достигать 120, а не 90 км, как утверждалось ранее;
- в отдельных случаях может происходить довольно стремительное растяжение ПАВ вдоль побережья;
- распространенной формой ПАВ являются их цепочки, составленные из двух (и, возможно, более) вихрей;
- наиболее часто ПАВ наблюдаются вдоль восточного побережья моря – от Керченского пролива до Батуми (рис. 8);
- грибовидные течения наиболее часто образуются вдоль западного и восточного побережий моря над бровкой шельфа, что указывает на совместное влияние преобладающих над акваторией ветров и неустойчивости ОЧТ;
- вихревые цепочки, обусловленные сдвиговой неустойчивостью – как циклонические, так и антициклонические – проявляются не только в мелких масштабах, но и в масштабах всего моря;
- часть акватории моря к югу от Керченского пролива между 44 и 45° с.ш. является областью повышенной гидродинамической неустойчивости, проявляющейся в квазирегулярном появлении здесь вихревых цепочек, составленных, как правило, из циклонических вихрей;
- южная периферия моря так же является областью квазирегулярного образования вихревых цепочек, но на характер проявления гидродинамической неустойчивости в этом районе большое влияние оказывает неоднородность береговой линии.

Таким образом, можно заключить, что прибрежная часть акватории, охваченная ОЧТ, по всему периметру моря является областью повышенной гидродинамической неустойчивости течений, но при этом вдоль западного и восточного побережий активность нестационарных вихревых движений проявляется преимущественно в виде грибовидных течений, а вдоль северного и южного (и частично восточного) – в виде вихревых цепочек (рис. 8).

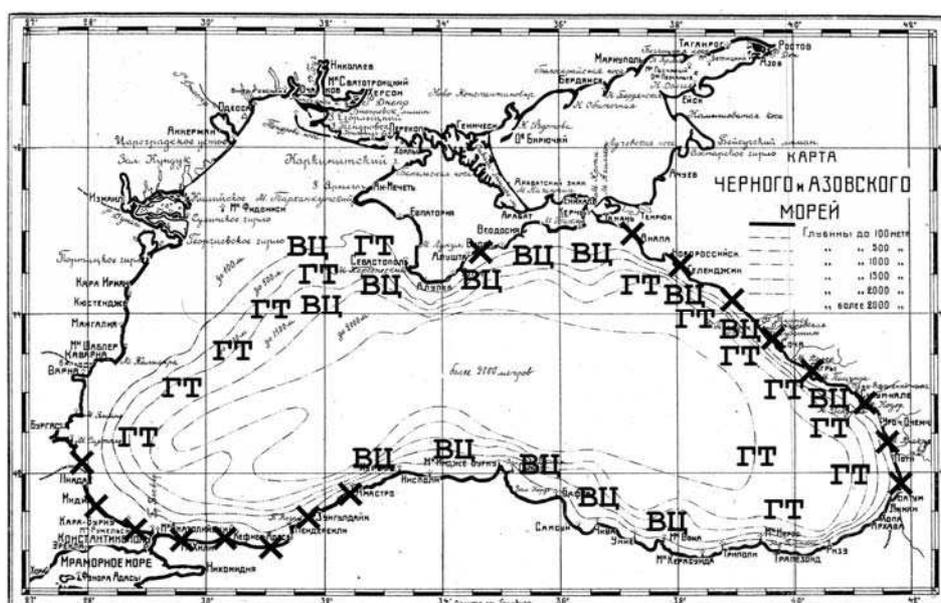


Рис. 8. Ареалы распространения отдельных форм вихревой динамики поверхностных вод Черного моря. Значками ГТ отмечены области преобладания грибовидных течений, ВЦ – вихревых цепочек, X – области образования ПАВ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №06-05-65177-а. Спутниковые данные получены на портале Морского гидрофизического института НАН Украины.

Литература

1. Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Костяной А.Г., Кривошея В.Г., Скурта А.Ю., Соловьев Д.М., Станичный С.В., Шеремет Н.А., Шиганова Т.А., Якубенко В.Г., Грегуар М. Антициклонические вихри в глубоководной восточной части Черного моря летом-осенью 1999 г. (спутниковые и судовые наблюдения) // Исследование Земли из космоса, 2001. №5. С. 3-11.
2. Зацепин А.Г., Голенко Н.Н., Корж А.О., Кременецкий В.В., Пака В.Т., Поярков С.Г., Стунжас П.А. Влияние динамики течений на гидрофизическую структуру вод и вертикальный обмен в деятельном слое Черного моря // Океанология, 2007. Т. 47. №3. С. 327-339.
3. Гинзбург А.И., Контарь Е.А., Костяной А.Г., Кривошея В.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В., Лаптев С.Ю. Система синоптических вихрей над свалом глубин в северо-западной части Черного моря летом 1993 г. (спутниковая и судовая информация) // Океанология, 1998. Т. 38. №1. С. 56-63.
4. Stanev E.V. Understanding Black Sea Dynamics: Overview of recent modeling // Oceanography. Vol.18, No.2, June 2005. Pp. 56-75.
5. Staneva J.V., Dietrich D.E., Stanev E.V., Bowman M.J. Rim current and coastal eddy mechanisms in an eddy-resolving general circulation model // J. Mar. Systems. 2001. V. 31. P. 137-157.
6. Кривошея В.Г., Тумов В.Б., Овчинников И.М., Москаленко Л.В., Скурта А.Ю., Монахов В.В. Новые данные о режиме течений на шельфе северо-восточной части Черного моря // Океанология, 2001. Т. 41. №3. С. 325-334.
7. Тумов В.Б. Морфометрические параметры и гидрофизические характеристики прибрежных антициклонических вихрей в Черном море // Метеорология и гидрология, 2002. №4. С. 67-73.
8. Тумов В.Б. Годовая изменчивость динамических параметров Кольцевого циклонического течения в северо-восточной части Черного моря // Метеорология и гидрология, 2003. №8. С. 80-88.
9. Тумов В.Б., Прокопов О.И. Характерные черты динамики и структуры вод прибрежной зоны Черного моря // Метеорология и гидрология, 2002. №5. С. 59-67.
10. Журбас В.М., Зацепин А.Г., Григорьева Ю.В., Еремеев В.Н., Кременецкий В.В., Мотыжжев С.В., Поярков С.Г., Пулейн П.-М., Станичный С.В., Соловьев Д.М. Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрейферным данным // Океанология, 2004. Т. 44. №1. С. 34-48.
11. Гинзбург А.И. Нестационарные вихревые движения в океане // Океанология, 1992. Т. 32. Вып. 6. С. 997-1003.
12. Lavrova O., T. Bocharova. Satellite SAR observations of atmospheric and oceanic vortex structures in the Black Sea coastal zone. Advance in Space Research, 38 (10), Pages 2162-2168, 2006.
13. Lavrova, O., M. Mityagina, T. Bocharova, and M. Gade. Multisensor observation of eddies and mesoscale features in coastal zones. In "Remote sensing of the European Seas", V. Barale & M. Gade Eds., Springer Verlag, 2008. Pp. 463-474.
14. Sur H.I., Ilyin Y.P. Evolution of satellite derived mesoscale thermal patterns in the Black Sea // Prog. Oceanog. Vol. 39. Pp. 109-151. 1997.
15. Taupier-Letage I. On the use of thermal infrared images for circulation studies : applications to the eastern Mediterranean basin. In "Remote sensing of the European Seas", V. Barale & M. Gade Eds., Springer Verlag, 2008. Pp. 153-164.
16. 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 // Настоящий сборник.