

Мезомасштабные вихри в северо-восточной части Черного моря: совместный анализ данных спутниковых и контактных наблюдений

С.С. Каримова

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

В статье представлены результаты совместного анализа данных контактных наблюдений, проведенных в северо-восточной части Черного моря, и спутниковых изображений, полученных с помощью радиометра AVHRR NOAA, а также радиолокационных изображений ENVISAT ASAR. В результате проведенного анализа прослежена эволюция двух мезомасштабных антициклонических вихрей различного происхождения и показано их влияние на гидрологическую структуру вод.

Ключевые слова: мезомасштабные океанические вихри, ринги, гидрологическая структура вод, AVHRR, радиолокационные изображения.

Введение

Несмотря на большое число публикаций, касающихся проблемы влияния вихревых образований на гидрологическую (а следовательно, и биологическую) структуру океанических вод, эта тема по-прежнему вызывает интерес исследователей. Особенную значимость она приобретает при изучении шельфовых вод внутренних морей, где процесс перемешивания – это один из важнейших механизмов их самоочищения [1]. В тех случаях, когда изучение динамических структур полностью или частично производится на основе спутниковых изображений различной природы, что часто сопряжено с некоторым субъективизмом исследователя, дополнительно возникает вопрос, насколько адекватно различные вихревые образования, детектированные с помощью спутниковых данных, отражают реальную гидрофизическую структуру поверхностных вод исследуемого бассейна.

Один из возможных подходов к решению обозначенных проблем заключается в сопоставлении результатов анализа данных, полученных квазисинхронно с помощью различных спутниковых приборов, а также в сопоставлении данных спутниковых и судовых контактных наблюдений. В предлагаемой статье представлены результаты такого анализа для северо-восточной части Черного моря. В работе были использованы спутниковые изображения, получаемые радиометром AVHRR NOAA в инфракрасном диапазоне спектра, а также радиолокационные изображения (РЛИ) РСА ASAR ENVISAT, которые анализировались совместно с данными гидрологических наблюдений, выполненных с борта НИС «Акванавт» (74-ый и 101-ый рейсы). Далее будут подробно рассмотрены два случая совместного анализа указанных данных для исследования происхождения и эволюции мезомасштабных антициклонических вихрей, а также оказываемого ими влияния на гидрологическую структуру вод.

Наблюдение эволюции антициклонического меандра ОЧТ

Относительно безоблачные условия в сентябре-ноябре 2004 г. позволили проследить по последовательности изображений температуры поверхности моря (ТПМ), полученным по данным AVHRR NOAA, формирование антициклонического меандра Основного черноморского течения

(ОЧТ) с центром, расположенным к юго-западу от м. Чуговкопас, и последующее его превращение в ринг.

Насколько можно заключить из имеющихся данных, зарождение меандра произошло в конце августа 2004 г. Ко времени проведения гидрологической съемки (18-23 сентября 2004 г., 74-ый рейс НИС «Акванавт») меандр эволюционировал в обширный ринг с теплым ядром с диаметром порядка 200 км. С течением времени и по мере продвижения вихря на северо-запад он становился более компактным и ярковыраженным; в начале октября 2004 г. диаметр ядра составлял около 100 км. В середине октября вихрь достиг в своем движении акваторию к югу от Керченского пролива, где находился до конца ноября 2004 г. Наступившие за этим неблагоприятные наблюдениям облачные условия не позволили проследить дальнейшую судьбу этого образования. С начала сентября до середины октября эта вихревая структура переместилась приблизительно на 230 км вниз по ОЧТ, т.е. происходило его поступательное движение со скоростью порядка 6 см/с.

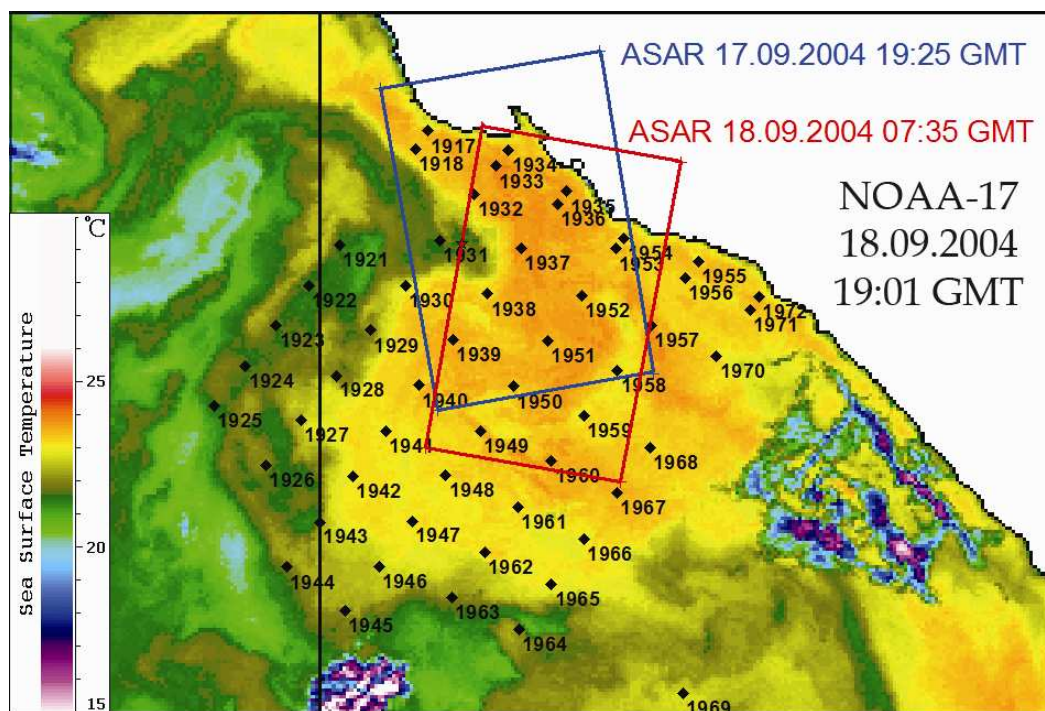
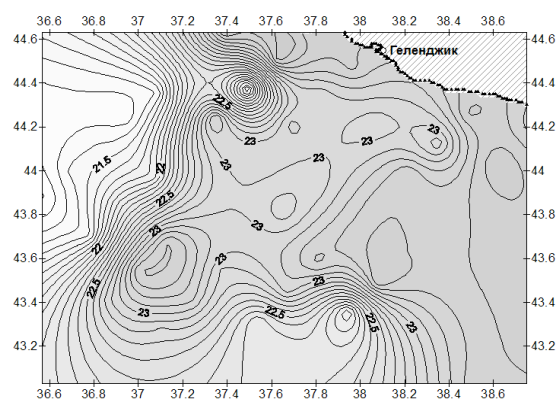


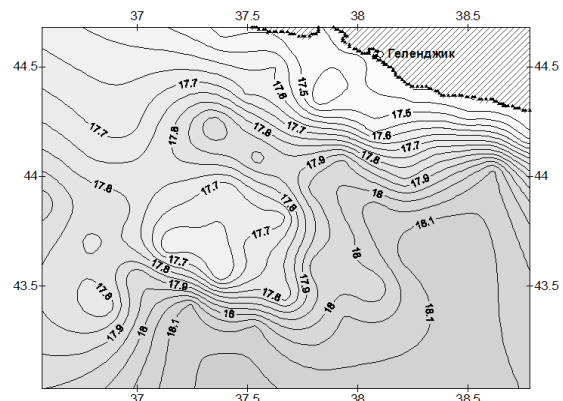
Рис. 1. Схема станций 74-го рейса НИС «Акванавт» (18-23.09.2004 г.), совмещенная с картой ТПМ, полученной по данным AVHRR NOAA-17 18.09.2004 г. в 19:01 GMT. Синей рамкой обозначены границы кадра РЛИ ASAR ENVISAT, полученного 17.09.2004 г. в 19:25 GMT, красной – 18.09.2004 г. в 07:35 GMT

На рис. 1 показано местоположение океанографических станций 74-го рейса, совмещенное с изображением ТПМ AVHRR NOAA, полученным 18.09.2004 г. в 19:01 GMT. Как видно из представленной схемы, измерениями было охвачено все пространство ринга. Анализ изменений полей температуры и солености с глубиной показал, что температурная и соленостная аномалии, связанные с образованием ринга, устойчиво сохранялись до глубины около 12 и 11 м соответственно, что соответствует верхней границе термо- и пикноклина. На рис. 2 представлены поля температуры и солености в области измерений на поверхности и на горизонте 20 м, вблизи которого аномалии температуры и солености, связанные с захватом в ходе образования ринга теплых и распресненных прибрежных вод, уже практически не сказываются.

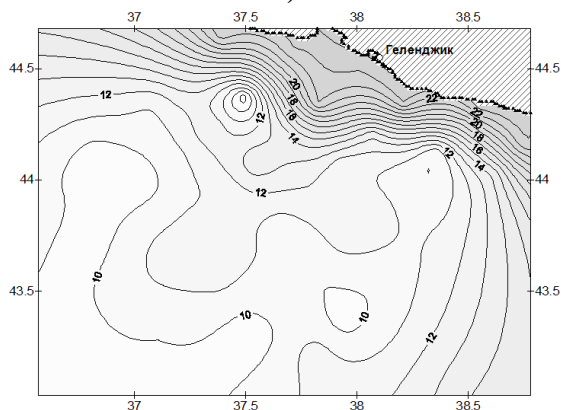
Анализ распределения температуры и солености на вертикальных разрезах выявил, что в результате прохождения ринга в наибольшей степени подверглись перемешиванию поверхностные воды в районе разреза через станции 1964-1972. На рис. 3а, б представлены схемы распределения температуры и солености на указанном разрезе. Наибольшая неоднородность поверхностных вод наблюдается, напротив, у передней (северной) границы ринга в районе станций 1926-1934 (рис. 3в, г).



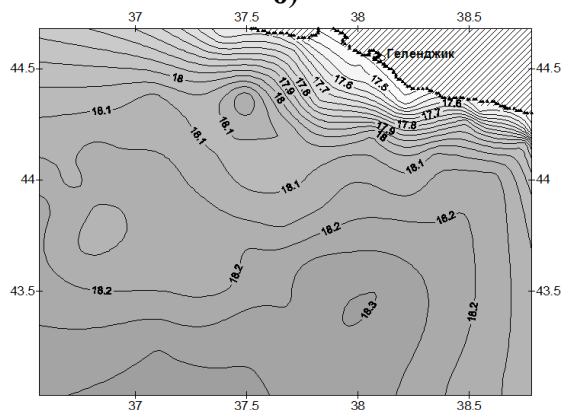
а)



б)

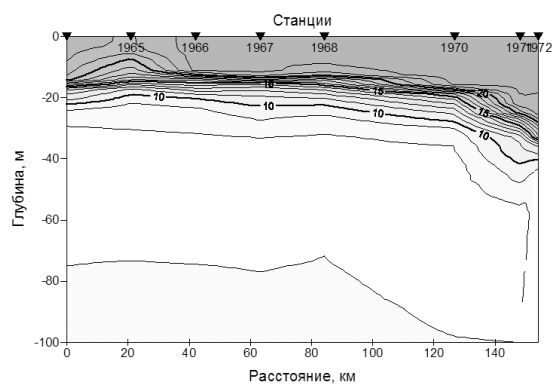


в)

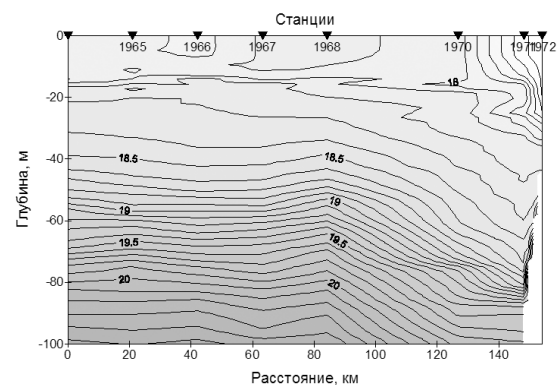


г)

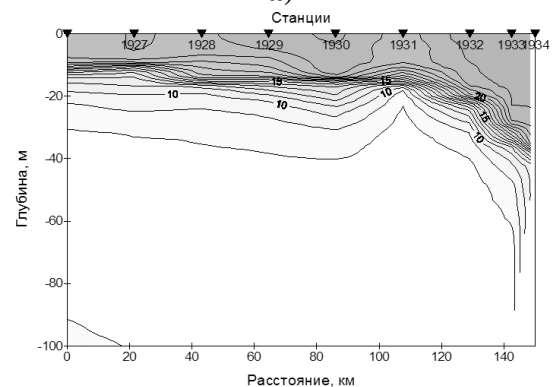
Рис. 2. Распределение температуры ($^{\circ}\text{C}$) и солёности (пс) в районе съёмки на поверхности (а, б) и на горизонте 20 м (в, г)



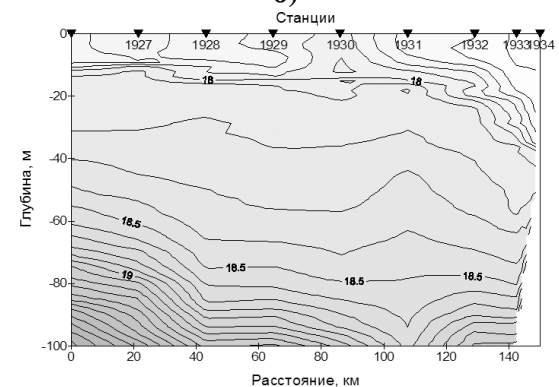
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Распределение температуры ($^{\circ}\text{C}$) и солёности (пс) на вертикальных разрезах вдоль станций 1964-1972 (а, б) и 1926-1934 (в, г)

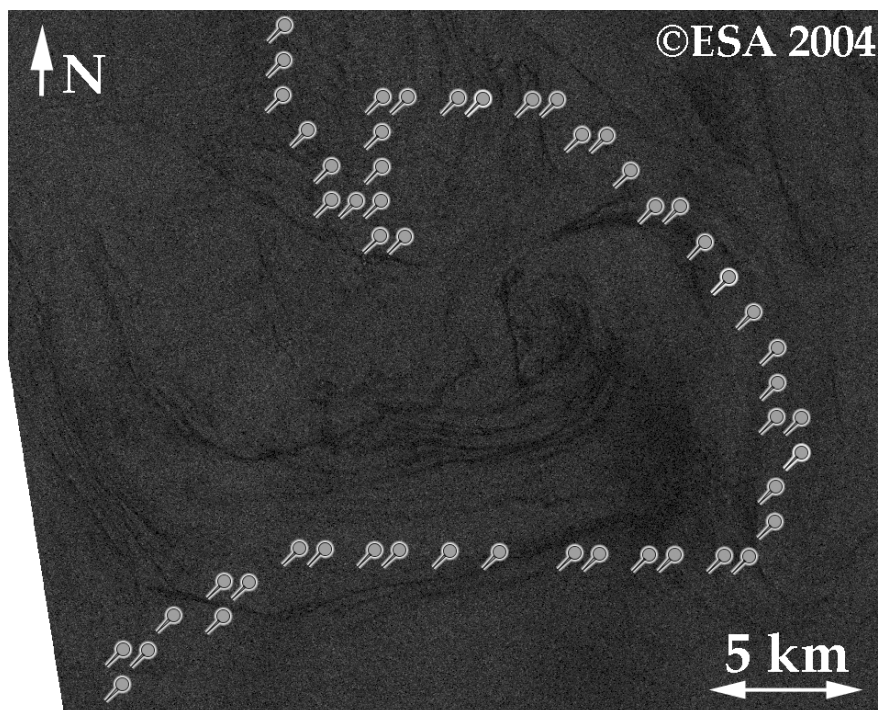


Рис. 4. Фрагмент РЛИ ASAR ENVISAT, полученного 17.09.2004 г. 19:25 GMT, с нанесенным на него обозначением положения термического фронта по данным AVHRR NOAA-17 от 18.09.2004 г. 19:01 GMT

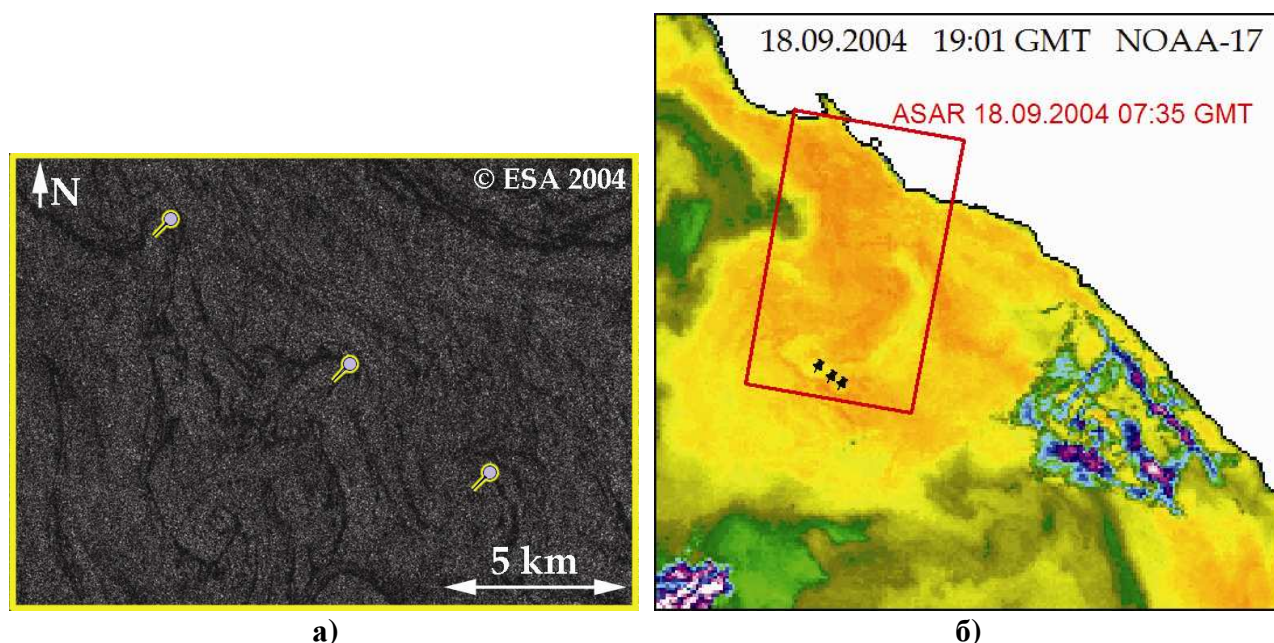


Рис. 5. Фрагмент РЛИ ASAR ENVISAT, полученного 18.09.2004 г. 07:35 GMT, (а) и фрагмент карты ТПМ по данным AVHRR NOAA-17 от 18.09.2004 г. 19:01 GMT (б). «Булавками» обозначены центры образующих цепочку циклонических вихрей

В период наблюдений также были получены РЛИ района исследования. На рис. 1 показаны границы РЛИ, полученных 17 и 18 сентября 2004 г. Из всех явлений, проявившихся на РЛИ, полученном 17.09.2004 г. в 19:25 GMT (его контуры показаны синим цветом), наибольший интерес представляет мелкомасштабный циклонический вихрь с диаметром около 8 км, расположенный у западной границы изображения. Сопоставление местоположения этого вихря с положением термического фронта на изображении AVHRR от 18.09.2004 г. (рис. 4) показывает, что, по всей вероятности, данный циклонический вихрь сформировался вследствие гидродинамической неустойчивости близ фронта исследуемого ринга.

На РЛИ, полученном 18.09.2004 г. в 07:35 GMT, так же отмечаются цепочки мелкомасштабных циклонических вихрей, расположенные у южной границы снимка, где проходит, в соответствии с изображением AVHRR, локальный термический фронт внутри ринга. На рис. 5а показан фрагмент РЛИ с указанными на нем положениями центров вихрей цепочки; на рис. 5б эти же центры показаны «булавками».

Исследование гидрологической структуры вод в районе формирования вихревого диполя

Анализ карт ТПМ AVHRR NOAA показал, что приблизительно 1 июня 2006 г. у восточного побережья Черного моря на траверзе м. Идокопас образовался вихревой диполь, диаметр антициклонической составляющей которого достигал приблизительно 90 км. Вплоть до середины июля 2006 г. эта структура прослеживалась на изображениях ТПМ, во многих случаях в составе различных вихревых диполей либо плотных упаковок этих структур.

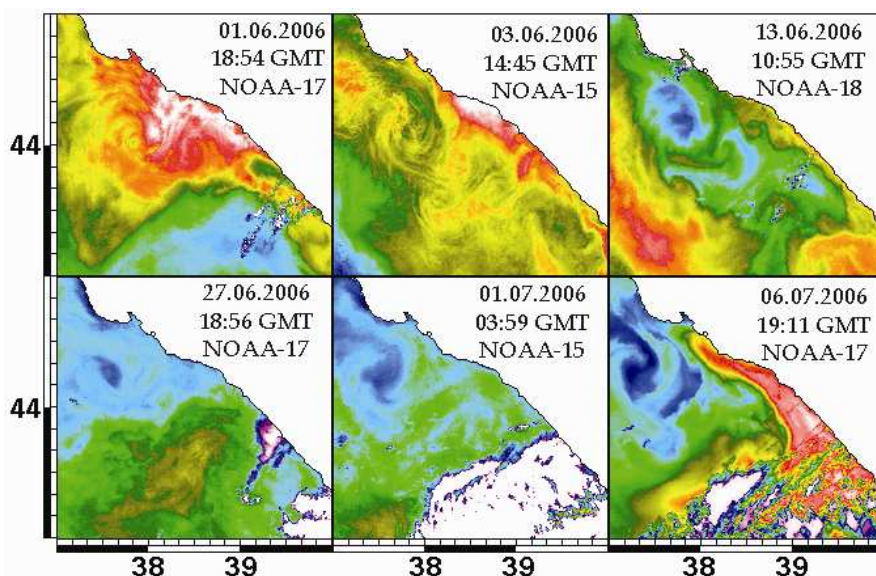


Рис. 6. Фрагменты изображений AVHRR NOAA, демонстрирующие различные этапы развития антициклонического вихря

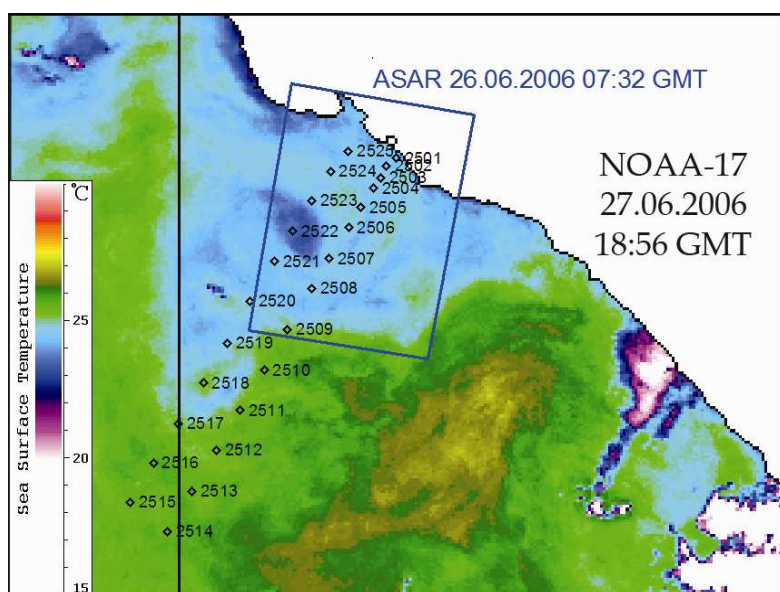


Рис. 7. Схема станций 101-го рейса НИС «Акванавт» (23-26.06.2006 г.), совмещенная с картой ТПМ, полученной по данным AVHRR NOAA-17 27.06.2006 в 18:56 GMT. Синей рамкой обозначены границы кадра РЛИ ASAR ENVISAT, полученного 26.06.2006 г. в 07:32 GMT

Некоторые этапы эволюции этого вихревого образования представлены на рис. 6. В целом за 40 дней спутниковых наблюдений вихревая структура сместилась на 80 км к северо-западу, что соответствует средней скорости поступательного движения около 2,3 м/с.

В период с 23 по 26 июня 2006 г. в районе указанного вихревого образования были выполнены гидрологические наблюдения с борта НИС «Акванавт» (101-ый рейс). На рис. 7 показано местоположение океанографических станций этого рейса, совмещенное с изображением ТПМ AVHRR от 27.06.2006 г. 18:56 GMT.

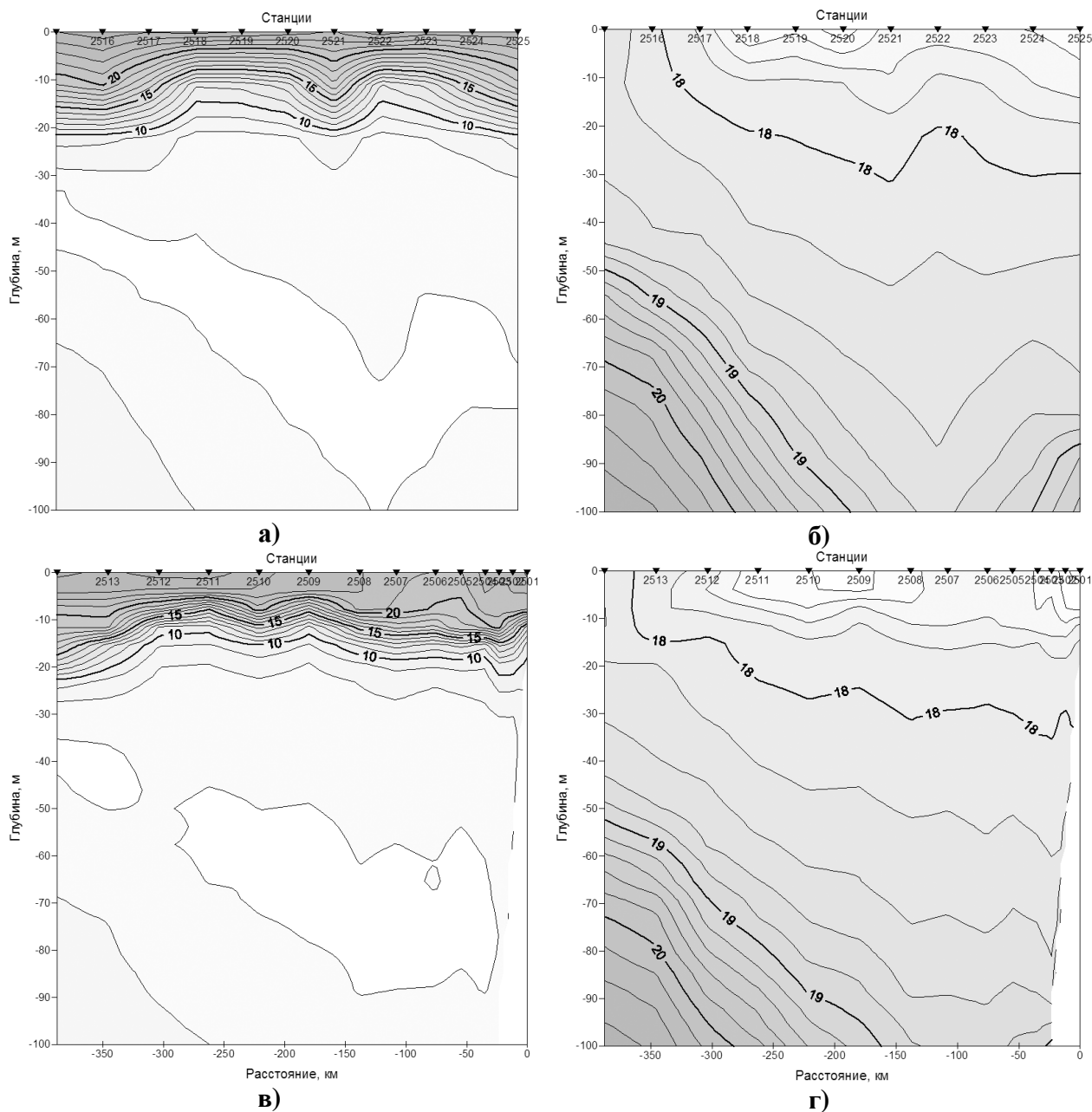


Рис. 8. Распределение температуры ($^{\circ}\text{C}$) и солёности (psu) на вертикальных разрезах вдоль станций 2515-2525 (а, б) и 2514-2501 (в, г)

Анализ распределения температуры и солёности вод на разрезе вдоль станций 2515-2525, проходящего через центр антициклонического вихря, представлен на рис. 8а, б. Как следует из приведенного рисунка, в районе станции 2522 происходит значительное отклонение изотерм и изогалин от субгоризонтального положения, а именно: до глубины порядка 50 м наблюдается их повышение, а глубже этой отметки – понижение. Следует заметить, что подобные возмущения изолиний не отмечаются на разрезе через станции 2514-2501, проходящем к югу от исследуемого вихря (рис. 8в, г).

Грибовидные течения (вихревые диполи), в состав которых входил исследуемый антициклонический вихрь, также отмечались и на радиолокационных изображениях. В частности, 19.06.2006 г. грибовидное течение отчетливо проявилось как на утреннем, так и на вечернем кадрах ASAR ENVISAT. Этот случай подробно рассмотрен в [2]. 26.06.2006 г. в 07:32 GMT было получено радиолокационное изображение ASAR ENVISAT, границы которого показаны на рис. 7. На этом изображении также проявилась исследуемая антициклоническая составляющая грибовидного течения.

Заключение

В работе было показано, что мезомасштабные вихревые структуры, выделяемые на спутниковых изображениях различной природы, представляют собой объективные элементы поверхностной циркуляции бассейна, оказывающие определенное влияние на гидрологическую структуру охватываемых ими вод. В частности, была исследована структура вод в районе формирования двух мезомасштабных вихрей различного происхождения: 1) крупного антициклонического ринга ОЧТ и 2) антициклонической составляющей вихревого диполя.

В случае с формированием ринга ОЧТ было установлено, что влияние такого вихря простирается лишь в надтермоклинной толще вод, но при этом в ней происходит значительное перемешивание и гомогенизация вод. Влияние «собственно вихревого» антициклонического вихря, входящего в состав вихревых диполей, распространяется на значительно большие глубины, способствуя более активному вертикальному перемешиванию вод.

В результате совместного анализа радиолокационных изображений и карт ТПМ, восстановленных по данным AVHRR, показано, что причиной формирования мелкомасштабных циклонических вихрей и их цепочек, очень часто проявляющихся на РЛИ исследуемого района, выступает гидродинамическая неустойчивость течений вблизи фронтальных поверхностей на границах более крупных вихрей.

Автор признателен С.С. Семенову за внимание к работе и ценные замечания.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №08-05-00831-а. Спутниковые изображения AVHRR NOAA получены на портале Морского гидрофизического института НАН Украины, радиолокационные изображения ASAR ENVISAT – в рамках проекта ЕКА Bear 2775. Данные рейсов НИС «Акванавт» предоставлены Южным отделением Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Литература

1. Зацетин 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.

2. Shcherbak S.S., O.Y. Lavrova, M.I. Mityagina, T.Yu. Bocharova, V.A. Krovotyntsev, and A.G. Ostrovskii. Multisensor satellite monitoring of seawater state and oil pollution in the north-eastern coastal zone of the Black Sea // International Journal of Remote Sensing, Volume 29, Issue 21 November 2008, pp. 6331-6345.

Mesoscale eddies in the Northeastern Black Sea: combined analysis of satellite and in situ data

S. Karimova

Space Research Institute of RAS

E-mail: feba@list.ru

In the paper the results of combined analysis of satellite and in situ data for the Northeastern Black Sea are presented. Satellite data used comprise SST AVHRR NOAA and ASAR ENVISAT images. On the base of these data the evolution of two different anticyclonic eddies (a ring and an eddy dipole) was observed. The focus is on eddies' impact on vertical structure of sea waters.

Keywords: mesoscale oceanic eddies, rings, hydrological seawater structure, AVHRR, ASAR ENVISAT.