

Антициклонический вихрь на шельфе северо-восточной части Черного моря: совместный анализ космических снимков и данных акустического зондирования толщи моря

А.Н. Серебряный^{1,2}, О.Ю. Лаврова¹

¹Институт космических исследований РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

²ФГУП «Акустический институт им. Н.Н. Андреева»
117036, Москва, ул. Шверника, 4
E-mail: serebryany@akin.ru

Антициклонические вихри на шельфе - характерная черта динамики вод Черного моря. В октябре 2006 г. были проведены исследования изменчивости течений в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря, вызванной прохождением над шельфом антициклонического вихря одновременно со слежением за распространением вихря по радиолокационным спутниковым снимкам. Измерение течений проводилось с помощью акустического профилографа ADCP "Rio Grande 600 kHz" на разрезах, ориентированных перпендикулярно береговой черте, и имевших протяженность от берега до края шельфа. Разрезы данных скорости течений дополнялись STD-зондированиями и делались с суточной периодичностью. В период с 6 по 10 октября наблюдалось прохождение вблизи Геленджика антициклонического вихря диаметром около 25 км, движущегося в направлении генерального потока Основного черноморского течения (ОЧТ). Детально прослежено за циклом изменения прибрежного течения, вызываемого проходящим вихрем - поворот течения на берег, течение параллельно берегу навстречу ОЧТ, поворот течения от берега в море, течение параллельно берегу, совпадающее с направлением ОЧТ. Скорость осредненного потока в вихре навстречу ОЧТ достигала 0.25 м/с. Отмечено спадание скорости потока от периферии вихря к центру. Выявлен, инициированный вихрем, значительный ход термоклина по вертикали и другие особенности.

Введение

Антициклонические вихри на шельфе – характерная черта динамики вод Черного моря и главная причина бимодального режима течений прибрежной зоны. Бимодальный режим течений у северокавказского побережья характеризуется периодической сменой направленности прибрежных течений с северо-западного (или западного) на юго-восточное (или восточное). Он изучен экспериментально в общих чертах с помощью нескольких заякоренных станций, оснащенных небольшим количеством измерителей течений, устанавливавшихся на шельфе северокавказского побережья вблизи Геленджика на длительные сроки [1]. В бимодальном режиме преобладает северо-западное течение: в среднем его присутствие характеризуется 90% времени, а юго-восточному течению остается лишь 10 % [1]. Появление юго-восточного течения связывают с прохождением над шельфом «прибрежных антициклонических вихрей» (ПАВ), которые образуются между стрежнем Основного черноморского течения (ОЧТ) и берегом, где вследствие бокового сдвига скорости существует зона антициклонической завихренности поля течений [2]. Существование ПАВ характерно для всего побережья Черного моря [3].

Информация о ПАВ, полученная традиционными контактными методами, ограничена и позволяет представить только общую картину явления и определить только некоторые параметры, такие как средние скорости течений и их максимальные величины на нескольких горизонтах. Применение современных методов исследования и новой инструментальной техники позволяет получить новые более детальные знания об этом явлении. В октябре 2006 г. с помощью акустического доплеровского профилографа течений (ADCP) модели "Rio Grande 600 kHz", выпускаемого фирмой TRD Instruments, были проведены исследования изменчивости течений в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря, вызванной прохождением над шельфом антициклони-

ческого вихря. Одновременно отслеживалось положение вихря по спутниковым радиолокационным и инфракрасным изображениям.

Краткие сведения об ADCP

Акустический доплеровский профилограф течений (ADCP) “Rio Grande 600 kHz” представляет собой четырехлучевой импульсный гидролокатор с частотой излучения 600 кГц с частотной обработкой сигнала. Он позволяет измерять две горизонтальные и вертикальную составляющие течений в морской среде относительно дна в диапазоне скоростей до 3 м/с. Точность измерения скорости $\pm 0.25\%$ от скорости воды, разрешение по скорости 1 мм/с. Скорость течения измеряется в ячейке высотой 50 см. Всего количество ячеек, охватывающих среду по глубине составляет 128. В прибор встроен компас, что дает возможность измерять компоненты течения в земных координатах. Точность компаса $\pm 0.5^\circ$. Измеритель работает при наклонах по вертикали не более 15° . Прибор регистрирует отраженный сигнал с погрешностью 1.5 дБ (разрешение 0.5 дБ) в диапазоне 80 дБ. Частота посылки сигнала может варьироваться до 2 Гц. Питание прибора – от постоянного напряжения 12 В. Каждый луч направлен под углом 20° от вертикали, ширина луча 3° , мощность при передаче 35 Вт. Габариты прибора 192 мм на 229 мм, вес на воздухе – 7.6 кг, в воде – 2.2 кг.

Прибор измеряет течения, используя эффект Доплера, излучая звук на частоте 600 кГц и принимая эхо, отраженное от рассеивателей звука в воде. Рассеивателями звука в море являются мелкие частицы и планктон – они присутствуют в морской среде практически всегда, а их перемещение в пространстве осуществляется течениями. В среднем они перемещаются с такой же горизонтальной скоростью, что и вода. Частота принятого эхо-сигнала имеет доплеровский сдвиг, обусловленный течением воды, захватившим рассеиватели звука, что является информацией о течении.

ADCP помимо данных о течениях позволяет получать другую интересную информацию, которая может быть полезна для изучения процессов в прибрежной зоне [4]. Прилагающееся к прибору программное обеспечение отображает в виде пространственных или временных разрезов две важные характеристики рассеянного сигнала - интенсивность обратного рассеяния (averaged intensity) и коэффициент объемного обратного рассеяния звука (averaged backscatter). Данные обратно рассеянного сигнала, во многих случаях дают возможность определить положение термоклина, присутствие на нем внутренних волн, а также некоторые другие интересные гидрофизические процессы.

Методика и результаты измерений

В октябре 2006 г. в период с 4 по 16 октября было сделано 10 выходов в море на лодке с мотором, оснащенной ADCP, во время которых делались разрезы, ориентированные перпендикулярно береговой черте. Разрезы имели протяженность от берега до края шельфа с глубиной 50 м (в нескольких случаях до точки резкого свала глубин). Длина разреза варьировалась в пределах 5-6 км. Скорость движения на разрезе была 1.5 - 2 м/с. При частоте посылки сигнала около 1 Гц, разрешение по горизонтали составляло около 2 м. На обратном пути, помимо записей ADCP, велись зондирования гидрологическим зондом CTD NIXC в дрейфе при остановках над глубинами 50 м, 45 м, 40 м, 35 м, 30 м, 25 м и 20 м. Зонд измерял с необходимой точностью вертикальные профили температуры и электропроводности (солености) воды.

На рисунке 1 показаны данные о средних течениях, полученные на шести разрезах, сделанных в течение недели соответственно 5, 6, 8, 9, 10 и 11 октября 2006 г. На первых двух разрезах 5 и 6 октября наблюдались течения северо-западного направления. 7 октября выхода в море не было из-за сложных погодных условий. К 8 октября произошло кардинальное изменение обстановки. Течение изменило свое направление на юго-восточное. Характерная смена направленности течения в прибрежной зоне свидетельствует о появлении антициклонического вихря. Наибольшей силы юго-восточное течение достигло 9 октября, 10 октября направление сохранялось, но течение

существенно ослабло. 11 октября направление течения снова изменилось на северо-западное, что свидетельствовало об окончании прохода вихря. Таким образом, прохождение антициклонического вихря на трассе Голубой бухты уложилось во временной отрезок менее 6 суток.

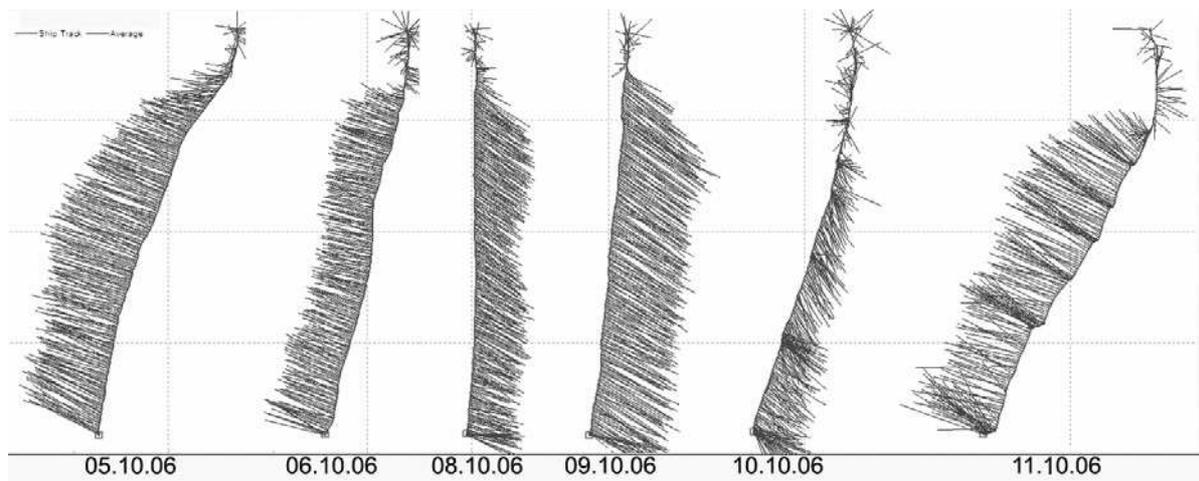


Рис. 1. Изменчивость течений на 6-км разрезе на юг от Голубой бухты, вызванная прохождением прибрежного антициклонического вихря. Наблюдения на ежедневных разрезах с 5 по 11 октября 2006 г. Смена северо-западного течения 6-8 октября на юго-восточное есть следствие подхода антициклонического вихря. Смена направления течения 11 октября свидетельствует об окончании прохода вихря

Радиолокационная съемка района эксперимента проводилась 5, 8, 9 и 11 октября 2006 г. с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой ASAR Envisat. На радиолокационных изображениях (РЛИ) вихревые структуры проявляются в первую очередь за счет сликов – полос или пятен выглаживания морской поверхности с пониженной интенсивностью коротких поверхностных волн (ряби). Вовлекаясь в орбитальные движения жидкости, пленки естественного происхождения как бы «прорисовывают» вихри на РЛИ [5]. На рисунке 2 представлено РЛИ ASAR Envisat от 5 октября 2006 г., на котором хорошо проявляется антициклонический вихрь с диаметром около 23 км. Вихрь имел вид эллипса с главной осью ориентированной по нормали к берегу. Он рас-

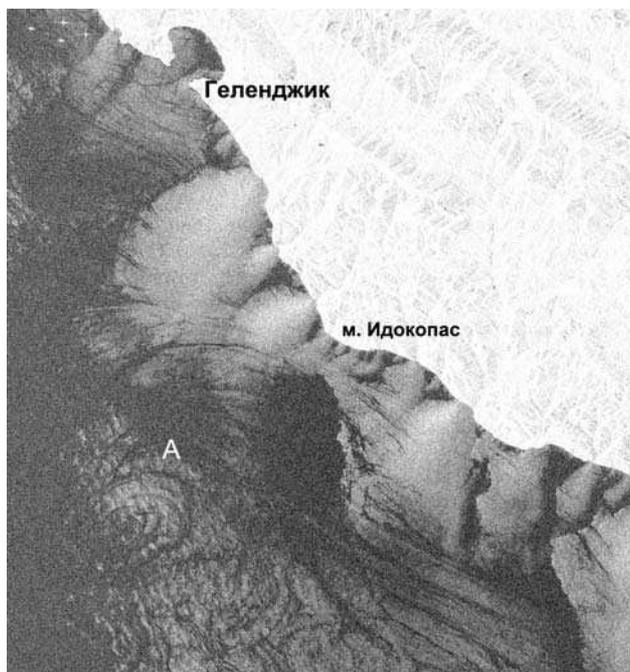


Рис. 2. Фрагмент ASAR Envisat изображения (50×50 км), полученного 05.10.2006 в 19:16 UTC, с пространственным разрешением 25 м. Антициклонический вихрь (А) с диаметром 23 км

полагался напротив м. Идокопас, на расстоянии 28 км от траверса Геленджика. Следует заметить, что поверхностные проявления вихря в виде темных спиралей на более светлом фоне достаточно близко были расположены к берегу, на расстоянии 3-4 км. На РЛИ от 8 октября (Рис.3) видна только тыловая часть вихря, однако возможна экстраполяция положения всего вихря, которая по-

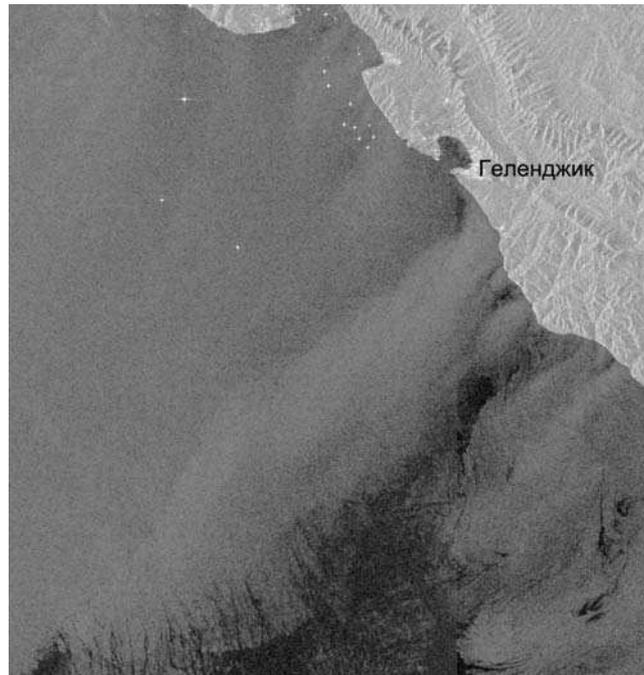


Рис. 3. Фрагмент ASAR Envisat изображения (70×75 км), полученного 08.10. 2006 в 19:22 UTC, с пространственным разрешением 150 км. В нижней части снимка видна тыловая часть антициклонического вихря

зволяет нам говорить о его нахождение в этот момент почти на траверсе Геленджика. Трансформация данного антициклонического вихря хорошо прослеживается и в поле поверхностной температуры (SST) на картах, восстановленных из данных сенсора AVHRR спутников серии NOAA. На рисунке 4 представлены фрагменты карт SST от 5 и 6 октября, по которым оценивались скорость и направление распространения вихря. Вихрь двигался с потоком Основного черноморского течения вдоль побережья на северо-запад со средней скоростью около 12 см/с (оценка сделана на основании сопоставления положений вихря на РЛИ от 5 и 8 октября и на картах SST от 5 и 6 октября).

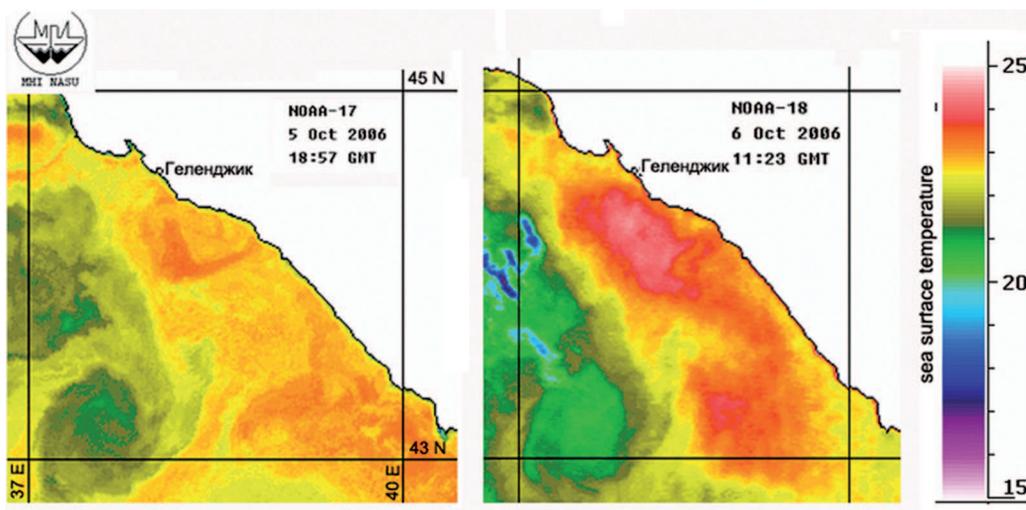


Рис. 4. Проявление антициклонического вихря в поле поверхностных температур по данным NOAA AVHRR за 5 и 6 октября 2006 г.

Особенности характеристик вдольберегового течения в прибрежной зоне при прохождении антициклонического вихря

Особенности среднего течения юго-восточных и северо-западных направлений

Проследим подробнее за циклом изменения прибрежного течения, вызываемого проходящим вихрем. На разрезах 5 и 6 октября течение по направлению совпадает с ОЧТ, при этом подход вихря проявляется в ослаблении северо-западного течения 6 октября. Следующий этап - поворот течения на берег, по-видимому, имел место 7 октября, но этой информацией мы не располагаем, потому что из-за погодных условий в этот день не смогли выйти в море. 8 октября мы встретили на разрезе течение параллельное берегу, направленное навстречу ОЧТ. На следующий день оно набрало наибольшую силу: на протяжении 6-километрового разреза оно сохраняло величину 20-25 см/с, достигнув максимума 28 см/с в прибрежной зоне на удалении от 1400 м берега. 10 октября юго-восточное течение ослабело, причем в нем заметна была тенденция поворота течения от берега в море. К тому же максимум течения сместился к наиболее глубоководной точке разреза. Все это свидетельствует о том, что на разрезе 10 октября была зарегистрирована тыловая часть антициклонического вихря. На разрезе 11 октября все следы прошедшего вихря исчезли, было обнаружено течение параллельное берегу, совпадающее с направлением ОЧТ.

Отметим характерную особенность юго-восточного течения, которое обязано своим происхождением проходящему антициклоническому вихрю. Наибольшие скорости в вихре следует ожидать на его периферии. Усиление течения в прибрежной зоне, которая является периферией для вихря отмечено нами ранее. Для разреза 9 октября на рисунке 5б показана величина среднего течения как функция расстояния от берега. За исключением зоны близкой к берегу (зона Голубой бухты, где имеет место локальный особый режим течений) среднее течение, достигнув своего максимума в 28 см/с, постепенно уменьшается при смещении на разрезе к большим глубинам. Горизонтальный градиент изменения течения составляет при этом около 2 (см/с) /км. В случае северо-западного течения, как правило, наблюдается обратная картина: сила течения увеличивается при продвижении от берега на большие глубины (рис. 5а).

Изменение направления течения с глубиной

Перейдем теперь к более детальному анализу характеристик течения. Данные, полученные с помощью ADCP позволяют проследить за изменением направления и силы течения по глубине. На рисунке 6 приведены данные о направленности течений на двух типичных разрезах – для режима течений в отсутствие вихря (а) и при его наличии (б). Видно, что при северо-западном потоке в верхнем 30-метровом слое моря течение однонаправленное (красно-малиновая палитра) (рис. 6а). В вихре ситуация иная, в верхнем 20-метровом слое однородное юго-восточное течение (сине-зеленая палитра), а ниже имеет место подворот потока на юг (зеленый цвет) (рис. 6б).

Сопоставление изменения интенсивности течения с глубиной в двух режимах прибрежного течения

На рисунке 7 приведены данные о распределении величины течений по глубине по всему разрезу в отсутствие вихря, 5 октября (а) и при вихре, 8 октября (б). Проводимое сопоставление не выявляет больших различий - в обоих случаях по водной толще доминирует течение более 0,3 м/с (показано красным), однако при вихре зона интенсивных течений подходит к берегу ближе.

Изменение интенсивности течения при проходе вихря

Остановимся на важном вопросе - структуре течений в вихре. Для анализа мы имеем два разреза, которые были сделаны в различные фазы прохождения вихря через траверс Голубой бухты.

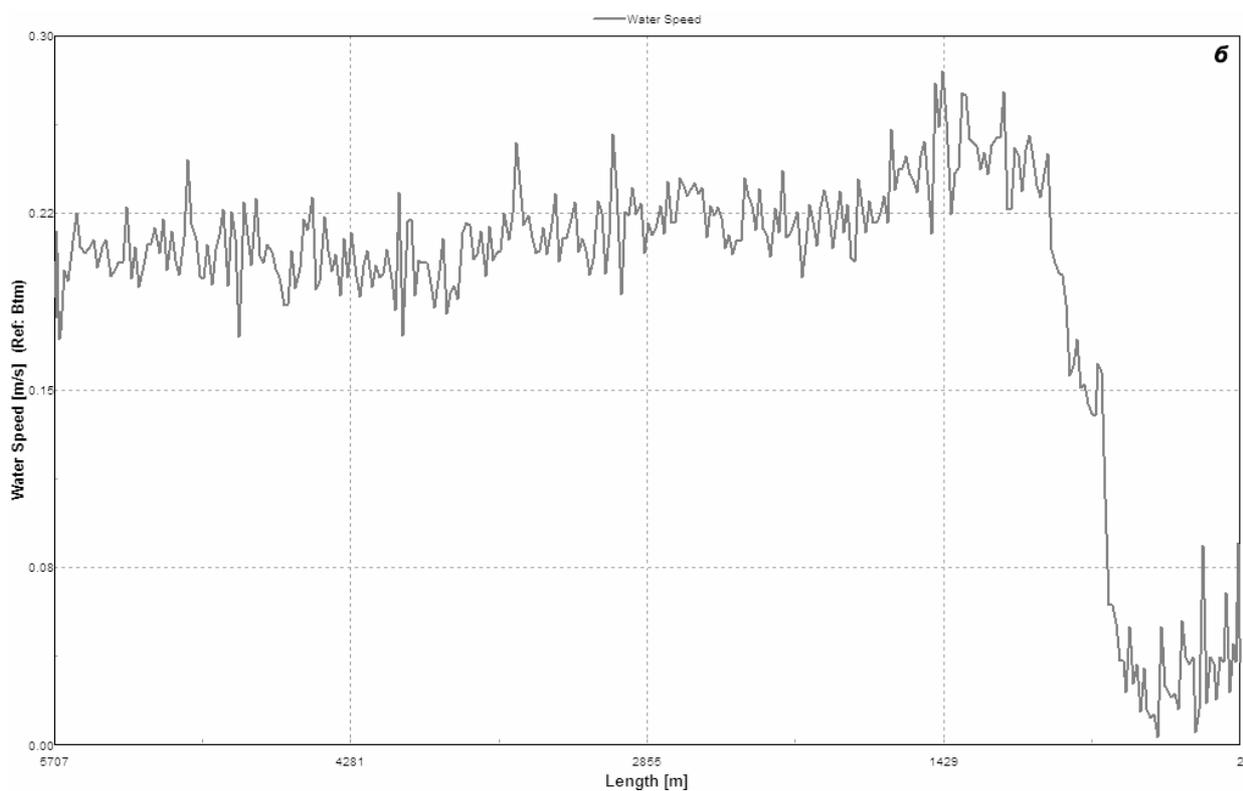
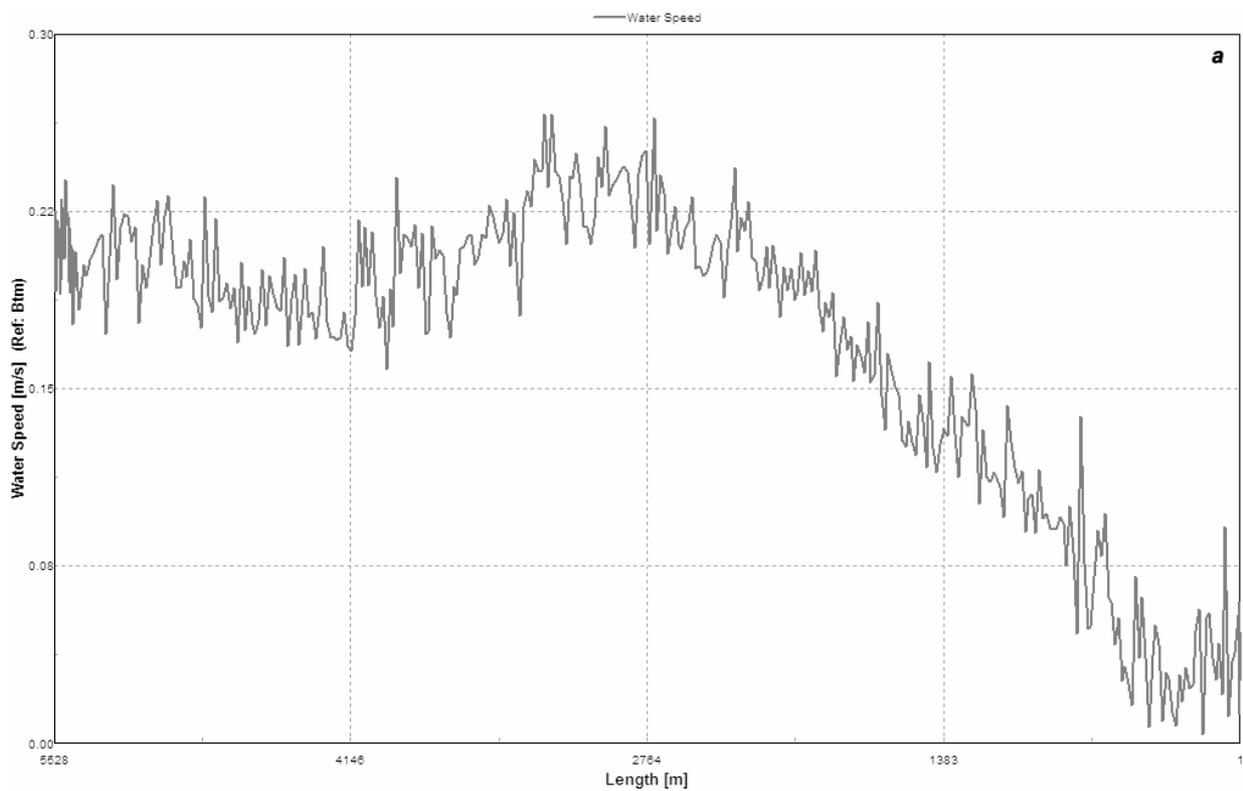


Рис. 5. Характерное изменение величины течения в зависимости от расстояния от берега в двух фазах бимодального режима течений на шельфе Черного моря: а) возрастание величины течения в среднем с удалением от берега при северо-западном направлении; б) уменьшение величины течения при юго-восточном направлении. Максимум величины течения достигается на периферии антициклонического вихря. Берег справа

Изменение интенсивности течения при проходе вихря

Остановимся на важном вопросе - структуре течений в вихре. Для анализа мы имеем два разреза, которые были сделаны в различные фазы прохождения вихря через траверс Голубой бухты.

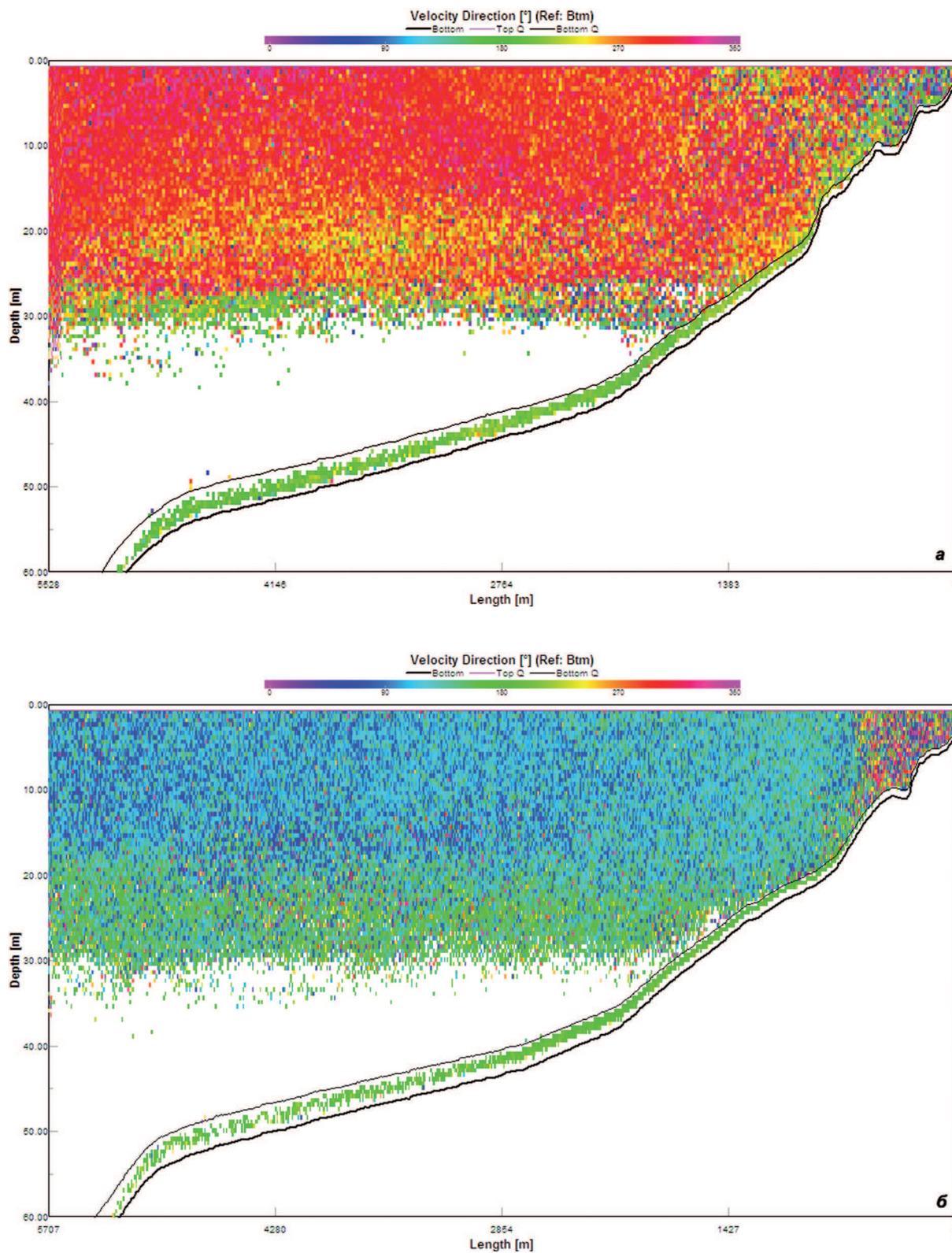


Рис. 6. Изменение направления течения по глубине: а) – при отсутствии вихря (05.10.06); б) – в вихре (08.10.06). Ниже верхнего 20-метрового слоя, в котором присутствует однородное юго-восточное течение, имеет место подворот потока на юг

На рисунке 7 (б и в) показаны распределения интенсивности течения с глубиной для разрезов 8 и 9 октября.

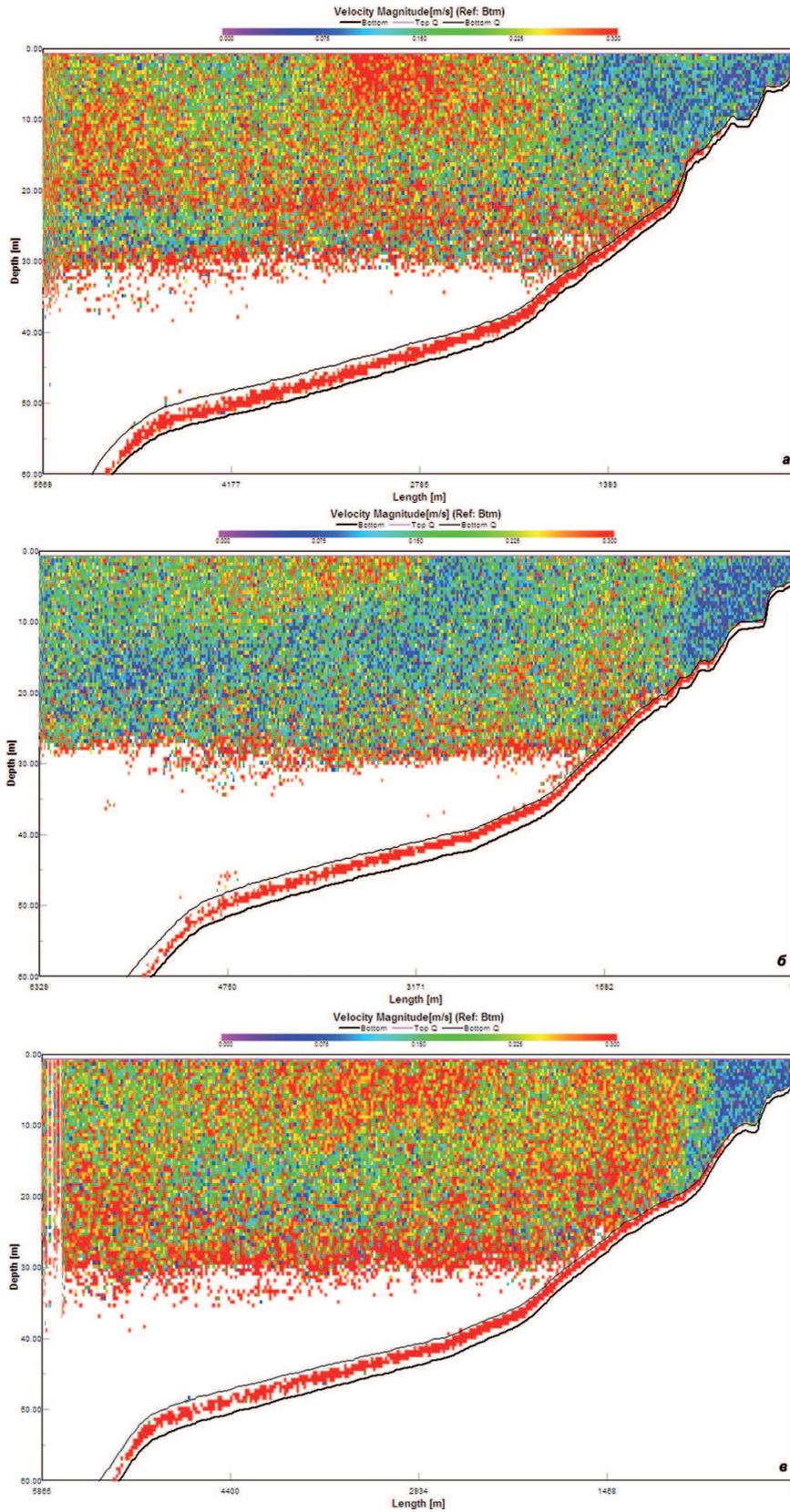


Рис. 7. Изменение интенсивности течения при прохождении вихря: а) при отсутствии вихря (05.10.06); б) в момент вхождения вихря на траверс наблюдения (08.10.06); в) центральная часть вихря проходит через траверс наблюдения (09.10.06). При прохождении вихря характерно появление струй интенсивного течения, выходящих из глубины к поверхности

Разрез 8 октября относится к моменту вхождения вихря на траверс наблюдения, для этого момента характерно в целом более слабое течение (сине-зеленые цвета с вкраплением красного) по сравнению с разрезом 9 октября (преобладание красно-желтых тонов), когда через траверс наблюдения проходила центральная часть вихря. Напомним, что в этом случае цветовая гамма на рисунке 7 от лиловой до красной, через голубую, зеленую, желтую, означает переход от скоростей течений от 0 до 30 см/с. На обоих сечениях характерно появление струй интенсивного течения, выходящих из глубины к поверхности. Причем 8 октября струи по интенсивности слабее, чем на разрезе 9 октября. Струи разделены областью слабого течения размером около 1500 м. Они выходят на поверхность, при этом образуя сдвиговые течения. Создаваемые ими сдвиговые течения на морской поверхности, по-видимому, образуют слики, подавляя поверхностное волнение в см-диапазоне, что дает возможность наблюдать спиралевидный рисунок вихрей на спутниковых снимках. При подходе вихря струи приближаются к берегу, а течение в них усиливается, что видно из сопоставления записей на разрезах 8 и 9 октября.

Влияние антициклонического вихря на положение термоклина

Остановимся еще на одной характерной особенности, создаваемой вихрем в прибрежной зоне. Юго-восточное течение создает условия подхода в прибрежную зону холодных придонных вод, оно работает в некотором смысле как нагонный ветер. На картинах обратного рассеяния акустического сигнала (рис. 8) термоклин виден в виде протяженной границы между водами голубо-

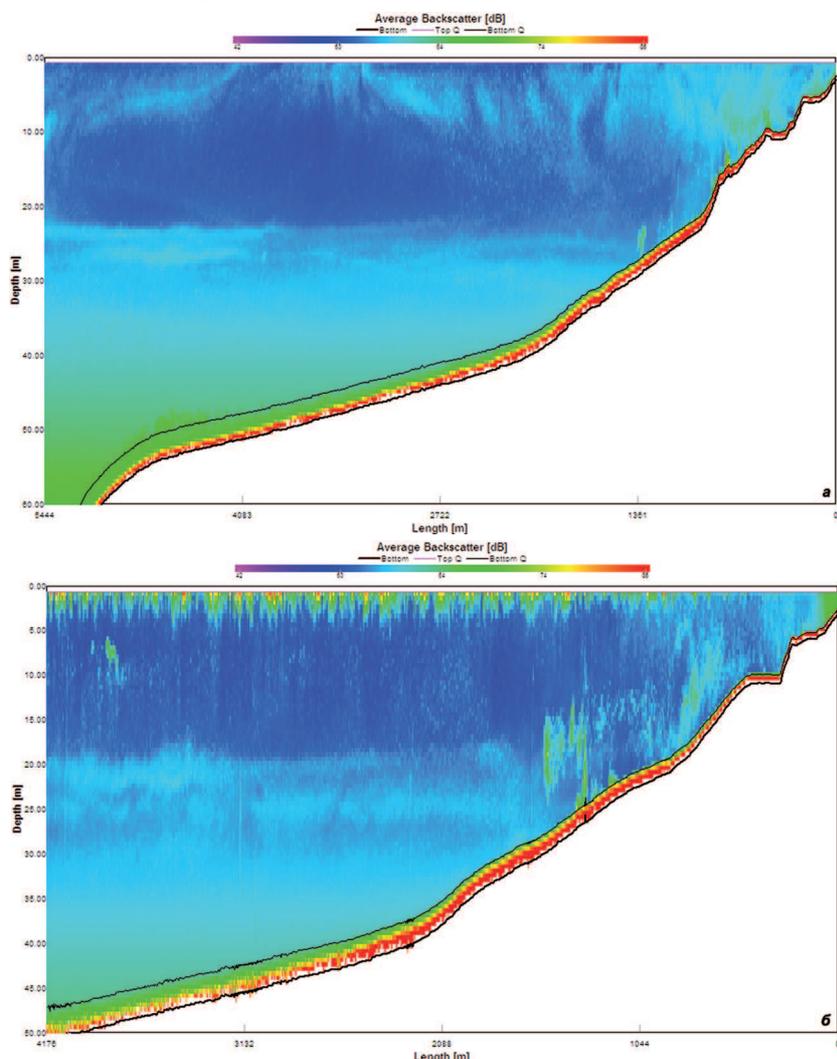


Рис. 8. Влияние антициклонического вихря на положение термоклина. Картины объемного обратного рассеяния акустического сигнала: а) 5.10.06 – до подхода вихря; б) 10.10.2006 – при проходе вихря. Термоклин по всему шельфу приподнят из-за прохода вихря на 3 м по сравнению с моментом до появления вихря

го и зеленого цветов в районе глубин 20 м. При прохождении антициклонического вихря термоклин по всему шельфу приподнят на 3 м (б) по сравнению с моментом до появления вихря (а).

Заключение

Таким образом, применение акустического профилографа “Rio Grande 600 kHz” для исследования течений в прибрежной зоне в моменты прохождения прибрежных топографических вихрей в северо-восточной части Черного моря, одновременное с проведением спутникового радиолокационного зондирования, позволило выявить новые важные особенности структуры течений прибрежного антициклонического вихря, что не представлялось возможным сделать ранее при применении стандартных методов исследований.

Работа была выполнена при поддержке РФФИ (проекты №06-02-31026, №06-05-65177, № 08-02-00952), а также фирмы TRD Instruments Europe, любезно предоставившей нам акустический профилограф “Rio Grande 600 kHz” на время проведения экспедиционных исследований. Спутниковые радиолокационные данные предоставлены Европейским космическим агентством (ЕКА) в рамках проекта АОВЕ 2775.

Литература

1. *Кривошея В.Г., Москаленко Л.В., Титов В.Б.* К вопросу о режиме течений на шельфе у северокавказского побережья Черного моря // *Океанология*, 2004. Т.44. №3. С.358-363.
2. *Титов В.Б.* Морфометрические параметры и гидрофизические характеристики прибрежных антициклонических вихрей в Черном море // *Метеорология и гидрология*, 2002. №4. С.67-73.
3. *Зацепин А.Г., Гинзбург А.И., Евдошенко М.А., Костяной А.Г., Кременецкий В.В., Кривошея В.Г. и др.* Вихревые структуры и горизонтальный водообмен в Черном море. - В кн.: «Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря». Под ред. А.Г. Зацепина, М.В. Флинта. М.: Наука, 2002, С. 55-81.
4. *Серебряный А.Н.* Опыт использования акустического доплеровского измерителя течений // *Акустика неоднородных сред. Ежегодник Российского акустического общества. Труды научной школы проф. С.А. Рыбака.* М.: МФТИ, 2003. С. 155-167.
5. *Лаврова О.Ю.* Сликы как индикаторы вихревой активности в прибрежной зоне // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сборник научных статей.* М.: GRANP polygraph, 2005. Т. II. С. 118-123.