

Дистанционные методы обнаружения внутритеrmоклиниых вихрей в океане

А.В. Березуцкий, В.Е. Скляров

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
117851 Москва, Нахимовский проспект, 36
E-mail: alxber@mail.ru, vsklyarov@km.ru*

Рассматриваются возможности дистанционного обнаружения внутритеrmоклиниых вихрей (ВТВ) в океане методами акустической локации и спутниковой альтиметрии. В качестве примера, приводятся результаты исследований ВТВ в Кадисском заливе и близлежащих к нему районах Атлантического океана. Распространение ВТВ и промежуточных средиземноморских вод можно проследить с помощью традиционной акустики, сейсмоакустики и космической альтиметрии.

Ключевые слова: дистанционные методы, акустические методы, сейсмоакустика, внутритеrmоклиниые вихри, спутниковая альтиметрия.

Введение

Внутритеrmоклиниые вихри встречаются в различных частях Мирового океана [1]. В Атлантическом океане ВТВ представляют собой линзы более теплых (на 4°C) и более соленых (на 1 промилле) вод средиземноморского происхождения. В Гибралтарском проливе расположены пороги-каньоны, которые и определяют особенности водообмена с Атлантическим океаном. Придонное течение, проходя через эти препятствия, образует выброс средиземноморских вод в Кадисский залив на глубинах 800-1300м. Этот выброс образует в Атлантическом океане промежуточные воды Средиземноморского происхождения (СМПВ). Кроме того, он приводит к периодическому образованию ВТВ как антициклонического, так и циклонического вида. Образовавшиеся вихри движутся в основном в двух направлениях: 1 - прямо на запад в открытый океан и 2 – на северо-запад вдоль Иберийского полуострова. Средняя скорость перемещения вихрей составляет порядка нескольких см/сек, а период вращения 4-6 дней [2]. Однако оказалось, что эта схема распространения ВТВ весьма приближенная. В дальнейшем линзы соленных и теплых вод стали обнаруживать в Канарской котловине вблизи Срединно-Атлантического хребта и, даже, в Саргассовом море. Было установлено, что за два года своей жизни такие линзы проходят расстояние около одной тысячи километров [2]. ВТВ переносят большое количество тепла и соли [3] и поэтому имеют весомое влияние на климатические характеристики океана. Обнаружение ВТВ традиционными средствами измерений в морских экспедициях – это весьма непростая и дорогостоящая задача. В настоящей работе рассматриваются возможности обнаружения и исследования ВТВ дистанционными методами. Для решения этой задачи нам представлялось целесообразным

рассмотреть возможность использования акустической локации с борта движущегося судна и измерений из космоса уровенной поверхности океана.

Акустическая локация ВТВ

1. Традиционные акустические методы

Полномасштабный комплекс натурных исследований влияния динамики промежуточных вод Средиземноморского происхождения (СМПВ) на структуру поля объёмного рассеяния звука в Центральной Атлантике был выполнен авторами настоящей работы на полигоне, ограниченном координатами $29\text{-}35^{\circ}\text{N}$ и $20\text{-}26^{\circ}\text{W}$. В результате целенаправленных исследований [4] были изучены особенности трехмерной структуры СМПВ и ВТВ и их влияния на пространственно-временную изменчивость объёмного рассеяния звука на частотах 12-24 кГц в диапазоне глубин 0-2000 м. Исследования проводились на 44 дрейфовых станциях, а также на переходах между этими станциями (рис. 1).

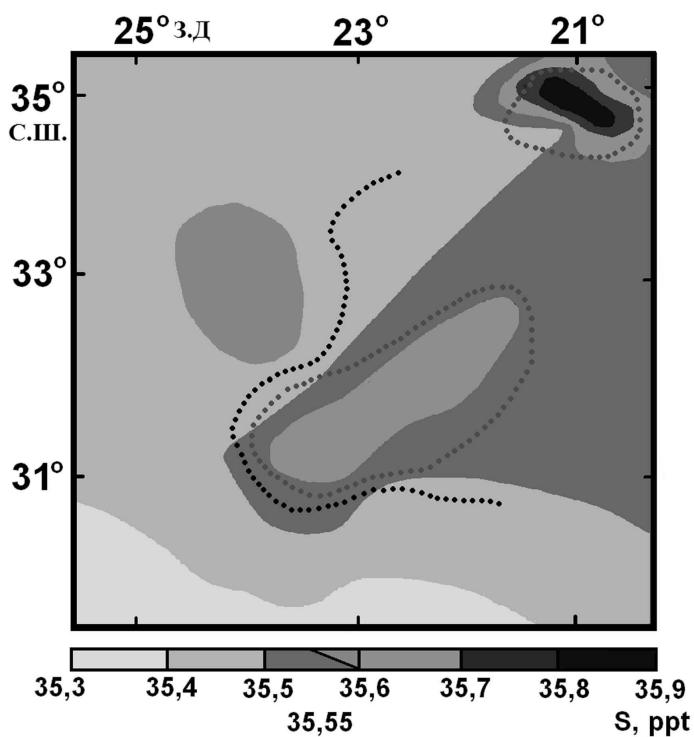


Рис.1. Распределение солёности на глубине 1100 м. (полигон в районе Канарской котловины). Язык промежуточных вод СМПВ (в центре) и ВТВ (верхний правый угол) оконтурены точечными линиями

Анализ данных гидрофизических измерений показал, что главной особенностью структуры СМПВ в центральной части исследованного района являлась меридиональная и зональная перемежаемость распределений температуры (T) и солёности (S) на глубинах

700-1800 м. При этом максимальные аномалии Т и S относительно фоновых значений за пределами полигона наблюдались на глубинах 1000-1100 м. Вариационный анализ данных СТД измерений выявил в исследованном регионе наличие пяти типов вертикальной тонкой структуры: 1 - «ступенчатой», 2 - «нерегулярной», 3 - «с сильным интрузионным расслоением», 4 - «со слабым расслоением», 5 - «ступеньки с боковой адвекцией». При этом важно отметить, что наиболее развитая тонкая структура была характерна для областей с максимальными аномалиями Т и S. Так, на горизонтах 1200-1300 м и 1700-1900 м была найдена хорошо сформировавшаяся тонкая структура «ступенчатого» типа. Для неё было характерно присутствие практически однородных по своим гидрофизическими характеристикам слоёв с вертикальными масштабами 40-60 м, разделёнными тонкими высокоградиентными прослойками (интерфейсными «ступеньками») с изменениями температуры и солёности в 0,3-0,5⁰C и 0,05-0,15 промилле соответственно. Следует отметить, что на отдельных станциях наблюдалось до 20 таких «ступенек». Расчёты значений характеристик тонкой структуры - плотностного соотношения R_p и параметра δ - дали значения 1,3-1,7 и 0,5-1,0 соответственно, что типично для механизма конвекции в виде солевых пальцев. В то же время для областей, где «ступеньки» не наблюдались, значения R_p и δ составляли 1,3-1,7 и 0,05-0,3, что соответствовало преобладанию тонкой структуры инверсионного типа. Интенсивное переслоение инверсионного типа было обнаружено на глубинах 600-1300 м в области повышенных значений температуры и солёности в районе 32⁰N, 22⁰W.

Отметим, что наиболее интенсивно развитая тонкая структура была найдена на границах обнаруженного в северо-восточной части исследованного района внутритеrmоклинного вихря (ВТВ) около 21⁰N, 35⁰W (рис.1). Типичные вертикальные размеры тонко-структурных образований составляли от 15 до 50 метров при средних значениях инверсий температуры и солёности 0,2⁰C и 0,07 промилле. Следует отметить, что на границах ВТВ также наблюдались и более мелкомасштабные (вертикальные размеры менее 15 м) тонко-структурные образования.

В целом распространение СМПВ в районе исследований характеризовалось существенной пространственной неоднородностью. Это проявлялось как в вариациях интегральной толщины слоя промежуточных вод, так и в вариациях (интегральных и локальных) аномалий температуры и солёности на горизонтах распространения СМПВ. Важным аспектом исследований явилось обнаружение связи между характеристиками изменчивости гидрофизических параметров и объёмного рассеяния звука на горизонтах распространения СМПВ. Данные акустических измерений показали, что на горизонтах распространения промежуточных вод в целом наблюдалась сложная картина обратного объёмного

рассеяния звука. При этом детальный анализ акустических изображений (локальных и интегральных) выявил ряд характерных особенностей и тенденций трёхмерной структуры и пространственно-временной динамики характеристик рассеяния звука. На рис. 2 приведены фрагменты акустических изображений структуры СМПВ в диапазоне глубин 750-1750 м в центральной и периферической частях обнаруженного в ходе проведенных исследований ВТВ.

Из анализа рис.2 следуют два главных вывода: 1 – на глубинах 850-1250 м наблюдается тенденция увеличения силы обратного объёмного рассеяния звука s_v в направлении от периферийной к центральной части ВТВ, 2 – на горизонтах 750-850 м на приведённых акустических изображениях отчётливо проявляется положение верхней границы СМПВ, а на горизонтах 1700-1800 м – положение нижней границы СМПВ. Последнее, в частности, свидетельствует о возможности мониторинга верхней и нижней границ распространения СМПВ в Центральной Атлантике акустическими средствами непосредственно с поверхности океана. Возможными причинами указанных особенностей пространственной структуры s_v являются, как минимум, три фактора: 1 – различие в биологических (немигрирующая компонента) свойствах этих областей СМПВ, 2 – различие в концентрации взвеси, 3 – пространственное различие в гидрофизических характеристиках.

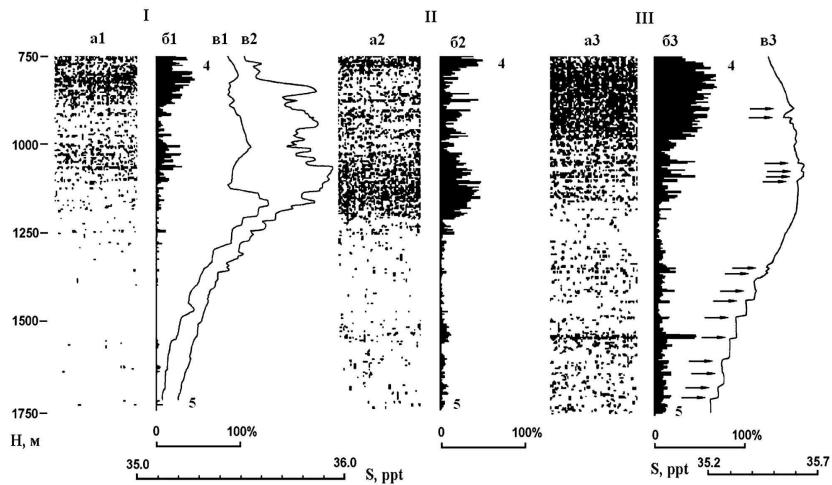


Рис. 2. Фрагменты акустических изображений (a1, a2, a3), вертикальные статистические распределения силы рассеяния s_v (b1, b2, b3 – шкала 0-100%) и профили солёности S (v1, v2, v3 – шкалы S , ppt) на периферии ВТВ (I), в центре ВТВ (II) и в области развитой «ступенчатой» тонкой структуры (III). Частота 12 кГц. Диапазон значений s_v от -85 дБ до -79 дБ. Профиль солёности в 2 сдвинут на 0,1 ppt относительно профия v1. 4 – верхняя граница СМПВ, 5 – нижняя граница СМПВ. Стрелками указаны положения высокоградиентных интерфейсных прослоек на вертикальном профиле солёности v3 в области развитой «ступенчатой» тонкой структуры

Анализ данных акустических измерений, проведённых на всех станциях исследованного региона, показал наличие слоистой структуры силы рассеяния s_v в диапазоне глубин 750-1750 м. Толщина «акустических» слоёв варьировалась от 0,75 м (вертикальное

разрешение акустических измерений) до нескольких десятков метров. При этом важно, что зонах между соседними «акустическими» слоями наблюдалось существенно более низкое рассеяние. Таким образом, наши исследования показали наличие тонкой структуры объемного рассеяния звука на горизонтах распространения

СМПВ. Совместный анализ данных акустических и гидрофизических измерений выявил существенную связь между особенностями тонкой структуры гидрофизических полей СМПВ и слоистой структурой объемного рассеяния звука. Так, например, толщина наиболее тонких звукорассеивающих прослоек не превышала вертикального разрешения акустических измерений, а пространственное положение этих прослоек совпадало с положением высокоградиентных участков в профилях гидрофизических характеристик СМПВ. Наиболее отчетливо это проявлялось на станциях, где наблюдалась сильно выраженная «ступенчатая» структура СМПВ. Приведенное акустическое изображение демонстрирует хорошее соответствие данных акустических и гидрофизических измерений (рис.2). Вместе с тем, оно также показывает те особенности структуры и динамики СМПВ, которые не могли быть прослежены на основе только СТД – измерений. К ним относились: 1 – существенные вариации толщины квазиоднородных слоев при условии как сохранения, так и изменения их глубины залегания, 2 – изменение глубины залегания этих слоев при сохранении их толщины, 3 – вариации толщины высокоградиентных термохалинных прослоек и, как следствие, изменение значений вертикальных термохалинных градиентов в этих прослойках. Отмеченные особенности указывают как на сложную динамику термохалинной тонкой структуры в исследованном регионе, так и на многообразие формирующих её процессов. Связь между акустической и термохалинной тонкой структурами была также найдена и на станциях, где «ступеньки» были трансформированы в «инверсии» за счет действия механизма изопикнической адвекции.

Резюмируя результаты проведенных экспедиционных исследований уверенно приходим к следующему выводу. Наши исследования продемонстрировали реальный потенциал дистанционного акустического обнаружения и мониторинга ВТВ с помощью судовых акустических комплексов в диапазоне частот 12-24 кГц.

2. Сейсмоакустические методы

В последние годы получила развитие океанографическая сейсмоакустика – новое направление в дистанционных методах исследования океана. Было обнаружено, что методы сейсморазведки в морской геологии, применявшиеся для изучения осадочных структур и придонных слоев, оказались пригодными и для исследования водной толщи океана. Эта

методология сейсмоакустических измерений получила название MCS (marine multichannel seismic data). В пионерской работе Холбрука и др. [5] показана принципиальная возможность исследования тонкой структуры в океане методами MCS сейсмоакустики.

Оказалось вполне реальным получать сейсмоакустические изображения процессов двойной диффузии и интерливинга на фронтальных разделах, а также внутренних волн. При этом для сейсмоакустических изображений (также как и для традиционных гидроакустических) характерно высокое пространственное разрешение, что существенно превышает возможности традиционных гидрофизических методов.

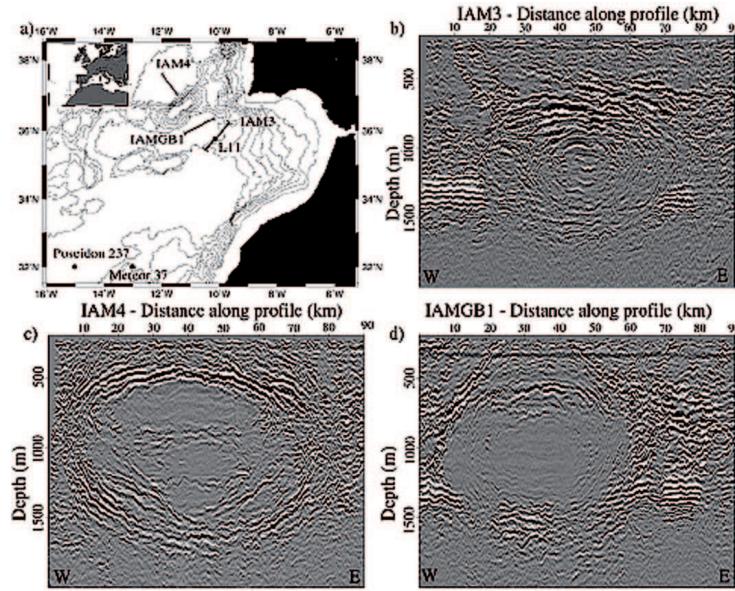
Физической основой для обнаружения ВТВ методом MCS является повышенное рассеяние сейсмоакустического сигнала (так же, как это было ранее обнаружено для диапазона частот традиционной гидроакустики [4]) на элементах тонкой структуры океанских вод. В работе [6] приводятся результаты сейсмоакустических исследований нескольких ВТВ в Кадисском заливе. Мы сочли возможным привести здесь сейсмоакустические изображения из этой работы. На рис.3 отчетливо видно, что детализация изображений линз очень высокая. Отдельные слои и границы линз четко выражены и хорошо контрастируют на фоне окружающих вод. Авторы [6] отмечают, что на сейсмоакустических изображениях отчетливо видна тонкая структура гидрофизических полей на верхней и нижней границах ВТВ, что позволяет исследовать процессы перемешивания и образования слоистости вод в толще океана.

Так, повышенное рассеяние характерно для верхней и нижней части линз средиземноморских вод, где наблюдается двойная диффузия. Также это происходит и на боковых границах линз, где присутствует ярко выраженное переслоение – интерливинг. Однако следует отметить, что для одного из сейсмоакустических изображений ВТВ [6] не характерно увеличение акустического рассеяния в центре линзы относительно фоновых значений на этих же горизонтах, что в совокупности с результатами ранее проведенных исследований [4] свидетельствует о сложной глубинной частотной зависимости рассеяния звука на неоднородностях водной толщи на горизонтах распространения СМПВ.

Обнаружение ВТВ из космоса

Оценка принципиальной возможности обнаружения ВТВ в инфракрасном и видимом диапазонах спектра предпринимались ранее. В докладе [7] применяется специальная методика фильтрации первичной информации со спутников NOAA для района Кадисского залива и вблизи побережья Португалии. Автор подтверждает успешность сделанных попыток обнаружения вихрей. В сообщении (Scientists use satellites to detect deep-ocean

whirlpools http://www.gisdevelopment.net/news/viewn.asp?id=GIS:N_vhxlmkqgyn) говорится о планах совместных работ группы ученых из разных стран по использованию информации со спутников NOAA и данных скаттерометра QuikScat для изучения ВТВ в Атлантическом и Тихом океанах.



*Рис.3. Результаты сейсмоакустических разрезов нескольких ВТВ в Кадисском заливе.
Сейсмоакустические изображения ВТВ заимствованы из работы B.Bioscas et all[6]*

Нам показалось целесообразным рассмотреть вопрос об использовании данных радиолокационных альтиметров в обсуждаемой проблеме. С этой целью мы решили проанализировать альтиметрическую информацию для хорошо выраженного и уверенно определенного в океане внутритеrmоклинного вихря. Обратимся вновь к рис.3 и рассмотрим данные сейсмоакустического зондирования по трассе IAMGB1, полученные 7 сентября 1993г. Выбор этого вихря был обусловлен тем, что он наиболее четко выражен в слоях акустического рассеяния и, в том числе, в верхнем слое океана. На сейсмоакустическом изображении DND IAMGB1 отчетливо виден условный выход изолиний рассеяния на поверхность, что, возможно, являлось благоприятным сопутствующим фактором для обнаружения этого вихря из космоса. На рис.4 представлены аномалии уровенной поверхности для Кадисского залива на ближайшую возможную дату (01.09.1993г) к дате судовых работ и на дату двумя неделями раньше (18.08.1993г.). Эти два альтиметрических изображения мы приводим специально для исключения эффекта случайного совпадения. На рис.4 (а и б) в районе разреза IAMGB1 хорошо видно наличие сильно выраженной отрицательной аномалии уровенной поверхности, достигающей в эпицентре 5 см. Отметим, что отрицательные аномалии уровенной поверхности характерны для вихрей антициклонического характера. Таким образом, мы приходим к выводу, что обнаружение ВТВ из космоса воз-

можно, и при этом данные радар-альтиметрии являются одними из перспективных для решения этой задачи.

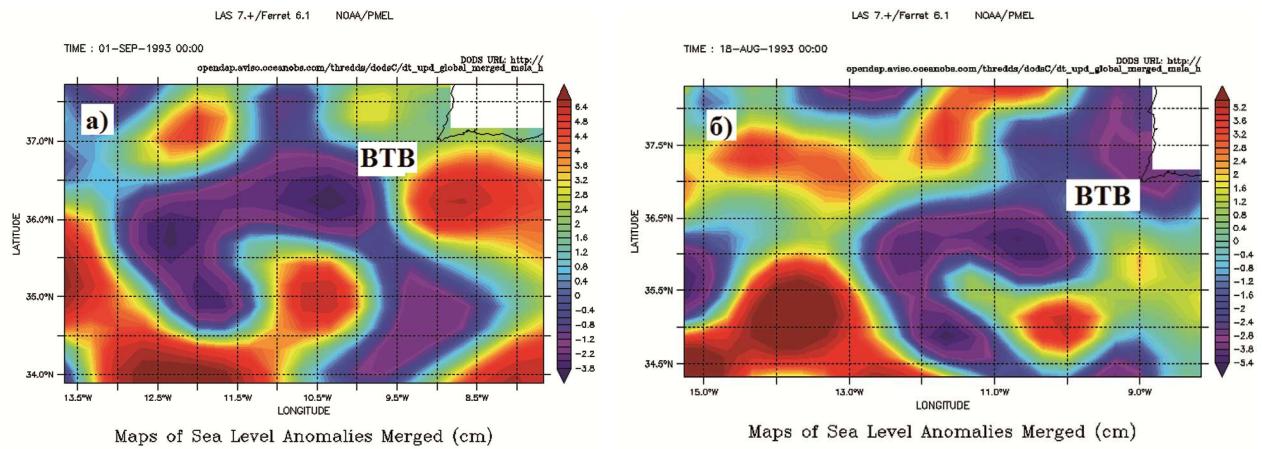


Рис. 4. Распределение аномалий уровенной поверхности для района Кадисского залива по данным спутникового альтиметра (<http://opendap.aviso.oceanobs.com>). Аномалии в области BTB совпадают с положением сейсмоакустического разреза IAMGBI на рис.3.

- a) местоположение BTB на 1 сентября 1993г.,*
- б) местоположение BTB на 18 августа 1993г.*

Второе, в чем хотелось бы убедиться - а насколько альтиметрические измерения отражают общую картину распространения средиземноморских промежуточных вод? Из экспериментальных данных и результатов компьютерного моделирования [8] известно, что промежуточные воды (СМПВ) формируются в Кадисском заливе в виде двух квазипаралельных струйных потоков. Обратимся к результатам моделирования и данным космической съемки. На рис.5 в качестве примера представлены результаты расчетов модели NLOM с усвоением реальных альтиметрических измерений из космоса. Можно отметить, что действительно мы наблюдаем именно двухпотоковый характер распространения СМПВ и BTB в Кадисском заливе.

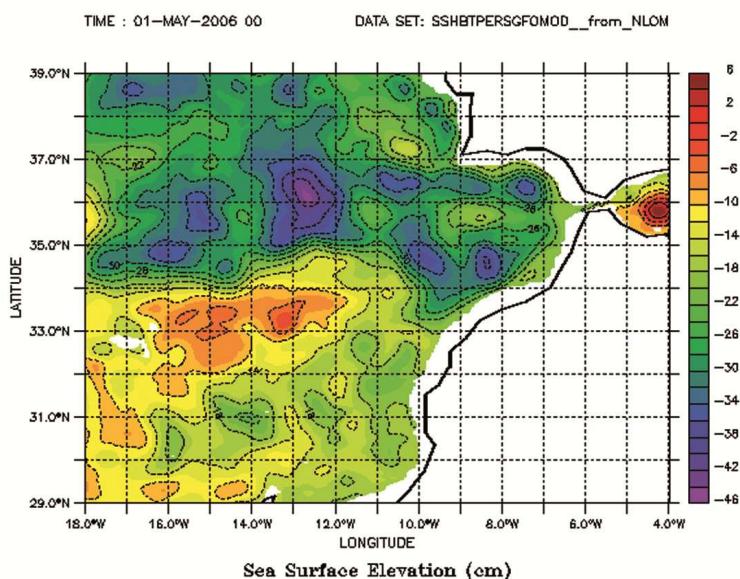


Рис.5. Аномалии уровенной поверхности для Кадисского залива по данным модели NLOM (<http://www.7320.nrlssc.navy.mil/altimetry/index.html>) с усвоением данных спутникового альтиметра

Заключение

Результаты проведенных исследований указывают на перспективность комбинированного применения акустических и космических дистанционных методов для изучения распространения промежуточных средиземноморских вод (включая ВТВ) в Атлантическом океане. Успешное применение альтиметрии для обнаружения ВТВ в Мировом океане представляется особенно важным, т.к. традиционные судовые методы весьма дорогостоящи и трудоемки. В настоящей работе нами не рассматривались вопросы, объясняющие физические механизмы, позволяющие наблюдать из космоса вихри, расположенные на большой глубине. По-видимому, именно вертикальные движения вод над вихревой линзой и порождают аномалию уровенной поверхности. Но однозначной модели, объясняющей наблюдаемый эффект, на настоящий момент у авторов нет. В научной литературе также не имеется необходимых сведений. Однако мы надеемся, что изложенные результаты привлекут внимание к данной проблеме и других исследователей.

Литература

1. Федоров К.Н. ред. Внутритеrmоклиновые вихри в океане // М.: ИОАН, 1986, 143 с.
2. Richardson P., Bower A., Zenk W. A census of meddies tracked by floats // Prog.Oceanogr. 2000, 45, Р. 209-250.
3. Филюшкин Б.Н., Мошонкин С.Н., Кожелупова Н.Г. Сезонная эволюция распространения вод Средиземного моря и Северной Атлантики // Океанология, 2008. Т. 48, №6, С.834-842.
4. Berezutskii A.V., Maximov S.E., Rodionov V.B., Sklyarov V.E. Mediterranean water structure in the Central Atlantic: Results of remote acoustic and conductivity-temperature-depth measurements // Journal of Geophysical Research, 1994, Vol.99, No. C10, P. 20,375-20,379.
5. Holbrook W.S., Paramo P., Pearse S., Schmitt R.W. Thermohaline fine structure in an oceanographic front from seismic reflection profiling // Science, 2003, Vol.301, P/821-824.
6. Bioscas B., Sallares V., et all. Imaging meddy finestructure using multichannel seismic reflection data // Geophysical Research letter, 2008, vol.35, L1160, doi:10.1029/2008GL033971.
7. Castellani M. Automatic detection of Mediterranean water eddies from satellite imagery of the Atlantic Ocean // Report on IPROMS Conference 2009, 6-17th July 2009.
8. Drillet, Y., Bourdallū-Badie, R., Siefridt, L., Le Provost, C. Meddies in the Mercator North Atlantic and Mediterranean Sea eddy-resolving model // Journal of Geophysical Research, 2005, Vol. 110, C03016, doi:10.1029/2003JC002170.

Remote sensing of Mediterranean water eddies in the Atlantic Ocean

A.V. Berezutsky, V.E. Sklyarov

*P.P.Shirshov Institute of Oceanology, RAS.
36 Nakhimovsky Pr., Moscow, 117851, Russia
E-mail:alxber@mail.ru, vsklyarov@km.ru*

The results of the study of peculiarities of propagation of Mediterranean waters through the Strait of Gibraltar in the Gulf of Cadiz are presented. The results showed that the propagation of Mediterranean waters (including meddies) can be traced by acoustic and seismoacoustic profiling of the water column and satellites altimetry.

Keywords: remote sensing, acoustic method, seismoacoustic profiling, satellites altimetry, meddies, Atlantic ocean