

УДК 551.465.42

## О ЛАГРАНЖЕВЫХ МЕТОДАХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ВНУТРИТЕРМОКЛИННЫМИ ВИХРЯМИ В ОКЕАНЕ

© 2014 г. Б. Н. Филюшкин<sup>1</sup>, М. А. Соколовский<sup>2</sup>, Н. Г. Кожелупова<sup>1</sup>, И. М. Вагина<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва  
e-mail: borfil@ioran.ru; nk@ioran.ru

<sup>2</sup>Институт водных проблем РАН, Москва  
e-mail: sokol@aqua.laser.ru

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет  
e-mail: iravag@rambler.ru

Поступила в редакцию 08.04.2014 г.

В восточной части Атлантического океана регулярно встречаются внутритермоклинные антициклонические вихри (линзы) средиземноморского происхождения. Эти вихри идентифицируются как со спутника по изменениям высот уровня и температуры на поверхности океана, так и по данным поплавков нейтральной плавучести (ПНП), помещенных в тело линзы.

В данной работе в рамках трехслойной квазигеострофической модели с использованием метода контурной динамики рассмотрены некоторые теоретические аспекты наблюдений за перемещениями линз с помощью акустических ПНП и свободно дрейфующих буев проекта «Арго». Данные прямых экспериментальных наблюдений за дрейфом линз в Северной Атлантике качественно подтвердили результаты наших численных экспериментов. В частности, показано, что закрутка со стороны линзы оказывает адвективное влияние на поведение ПНП на расстояниях нескольких ее радиусов.

DOI: 10.7868/S0030157414050050

В умеренных широтах северо-восточной части Атлантического океана на промежуточных глубинах 500–1500 м регулярно встречаются внутритермоклинные антициклонические вихри (линзы) [1, 6, 12]. Они представляют собой заполненные теплыми и солеными средиземноморскими водами эллипсоидные образования с горизонтальными осями от 40 до 100 км и вертикальной от 0.4 до 0.9 км. Отличие характеристик в ядре линзы от окружающих вод может меняться в пределах 1–4°C по температуре и 0.3–1.0 епс по солености в зависимости от ее удаленности от района формирования. Время жизни таких вихрей лежит в диапазоне 3–7 лет, причем в этой части океана их может находиться от 150 до 200 одновременно [3, 9].

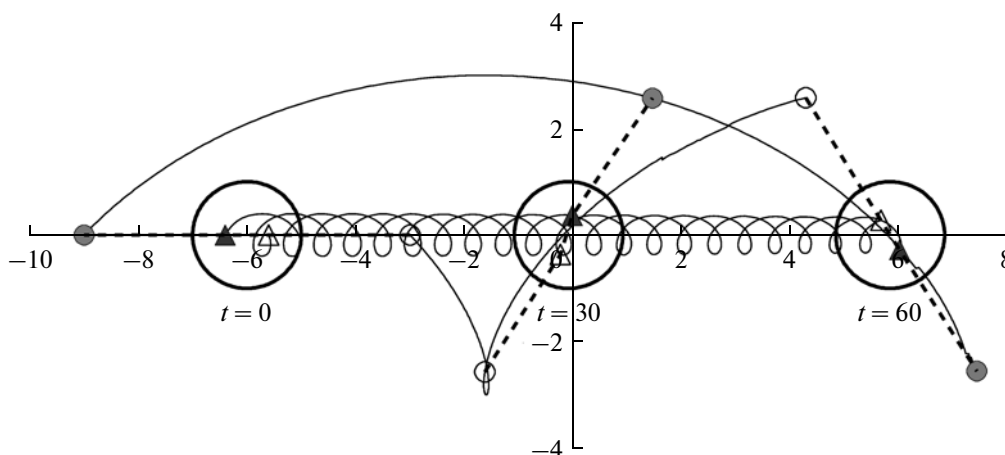
Обнаруживаются такие линзы при гидрологических полигонных съемках, на разрезах, а также при анализе материалов наблюдений профилографов глобального океанографического проекта «Арго» (название происходит от имени легендарного корабля аргонавтов в древнегреческой мифологии). В процессе взаимодействия этих вихрей с окружающей средой они могут передавать динамический сигнал к поверхности океана [1, 4, 8]. Эти вихри идентифицируются на альтиметрических снимках изменения уровня поверхности океана со спутника [4, 8], а также по аномалиям температуры поверхности океана [14, 15].

Таким образом, система спутниковых наблюдений позволяет фиксировать картину эволюции не только поверхностных вихрей, но и процессы слияния и разделения внутритермоклинных линз, а также их взаимодействия с различными формами подводного рельефа. Но, к сожалению, пока корреляция их положения по спутниковым наблюдениям с гидрологическими измерениями недостаточно надежна.

Поэтому для регистрации длительных наблюдений за перемещением вихрей в океане целесообразно также использовать поплавки нейтральной плавучести (ПНП), помещенные в тело самой линзы. В 1984–1986 гг. был осуществлен крупномасштабный эксперимент, в котором в течение двух лет с помощью акустических ПНП наблюдались перемещения трех линз [6, 12]. Эти линзы имели средний диаметр около 100 км и толщину около 800 м, а их ядра располагались на глубине примерно 1100 м.

В данной работе мы рассмотрим некоторые теоретические аспекты наблюдений за линзами с помощью обоих этих методов.

Будем использовать трехслойную квазигеострофическую модель [2, 3], в рамках которой под линзами будем понимать вихревые пятна среднего слоя, а с ПНП будем отождествлять центры пассивных малых первоначально круговых областей жидкости, принадлежащей либо линзе, либо ее



**Рис. 1.** Конфигурации первоначально круговой линзы (жирные замкнутые линии) в указанные моменты безразмерного времени  $t$  и траектории четырех модельных ПНП (тонкие линии) в баротропном зональном потоке восточного направления. Внешние (внутренние) ПНП изображены в виде сплошных и полых круговых (треугольных) маркеров. Для фиксации положений маркеров в моменты времени  $t = 0, 30, 60$  они соединены штиховыми отрезками.

окрестности. Параметры модели: при средней глубине океана  $H = 4000$  м толщины верхнего, среднего и нижнего слоев примем равными соответственно  $H_1 = 600$  м,  $H_2 = 1000$  м и  $H_3 = 2400$  м (для безразмерных толщин имеем  $h_1 = 0.15$ ,  $h_2 = 0.25$ ,  $h_3 = 0.6$ ), а первый и второй радиусы деформации —  $Rd_1 = 32$  км,  $Rd_2 = 15$  км. Эти величины характерны для северо-восточной части Атлантики. При таком выборе средний слой занимает горизонты 600–1600 м, в качестве горизонтального масштаба длины примем  $Rd_1$ .

На рис. 1 показаны траектории четырех модельных ПНП, которые в исходном состоянии имеют следующее расположение: все они принадлежат одной прямой; два из них помещены внутрь круговой линзы на расстоянии 0.4 ее радиуса от центра и два других — вне линзы на расстоянии в 3 радиуса от центра. Безразмерный радиус круга равен единице, т.е. диаметр моделируемой линзы составляет 64 км, а безразмерная единица времени отвечает одним суткам. Вихрь переносится баротропным, направленным на восток зональным потоком со скоростью, которая при выбранных масштабах равна 7.41 см/с. Очевидно, в этой простейшей ситуации линза перемещается поступательно, практически не меняя свою форму (на рисунке ее контуры представлены для моментов 0, 30 и 60), а внутренние ПНП вращаются относительно ее центра с орбитальной скоростью жидких частиц на том же удалении от центра и, таким образом, описывают спирали, сдвинутые друг относительно друга на полпериода. Именно так выглядит значительная часть траекторий линзы М1 в эксперименте 1984–1986 гг. [6, 11, 12] и траекторий ПНП 171, 175, 177 в эксперименте 1993–1995 гг. в [13]. В течение всего времени наблюдения за линзой М1 ПНП находились внутри

нее и имели антициклоническое вращение с периодом 6 суток. При этом период вращения оставался постоянным в продолжение двух лет, несмотря на значительное уменьшение объема линзы за счет процессов перемешивания на ее внешних границах. Отметим, что в работах [10] и [16] подобная консервативность ротационного периода эллипсоидальных вихрей подтверждается численными экспериментами в рамках диффузионной модели.

Сложнее выглядят траектории внешних ПНП, находящихся под совместным влиянием относительно слабой закрутки потока со стороны линзы и основного течения: они носят петлеобразный периодический характер. На рис. 1 центр линзы в начальный момент времени расположен в точке с координатами  $(-6; 0)$ , а ПНП начинают движение из точек с координатами  $(-9; 0)$  и  $(-3; 0)$ ; расчетный интервал составляет менее половины периода обращения этих поплавков вокруг линзы. Данный численный эксперимент показывает, в частности, что воздействие линзы на поток распространяется на расстояния, значительно превышающие ее радиус.

На рис. 2 демонстрируется степень такого воздействия со стороны неподвижной (т.е. при отсутствии внешнего течения) круговой линзы на серию окружающих ее изначально искусственно возмущенных маркерных линий (их невозмущенные радиусы  $R$  равны 1.5, 2.0, ..., 4.5, а возмущения в виде восьмой гармонической моды имеют в случае (а) амплитуду 0.05 и в случае (б) амплитуду 0.1 относительно радиуса). Мы видим, что к моменту времени  $t = 15$ , т.е. через 15 суток, на контурах с радиусами  $R$  от 1.5 до 2.5 в первом случае и до 3.5 во втором случае образовались затяжки.

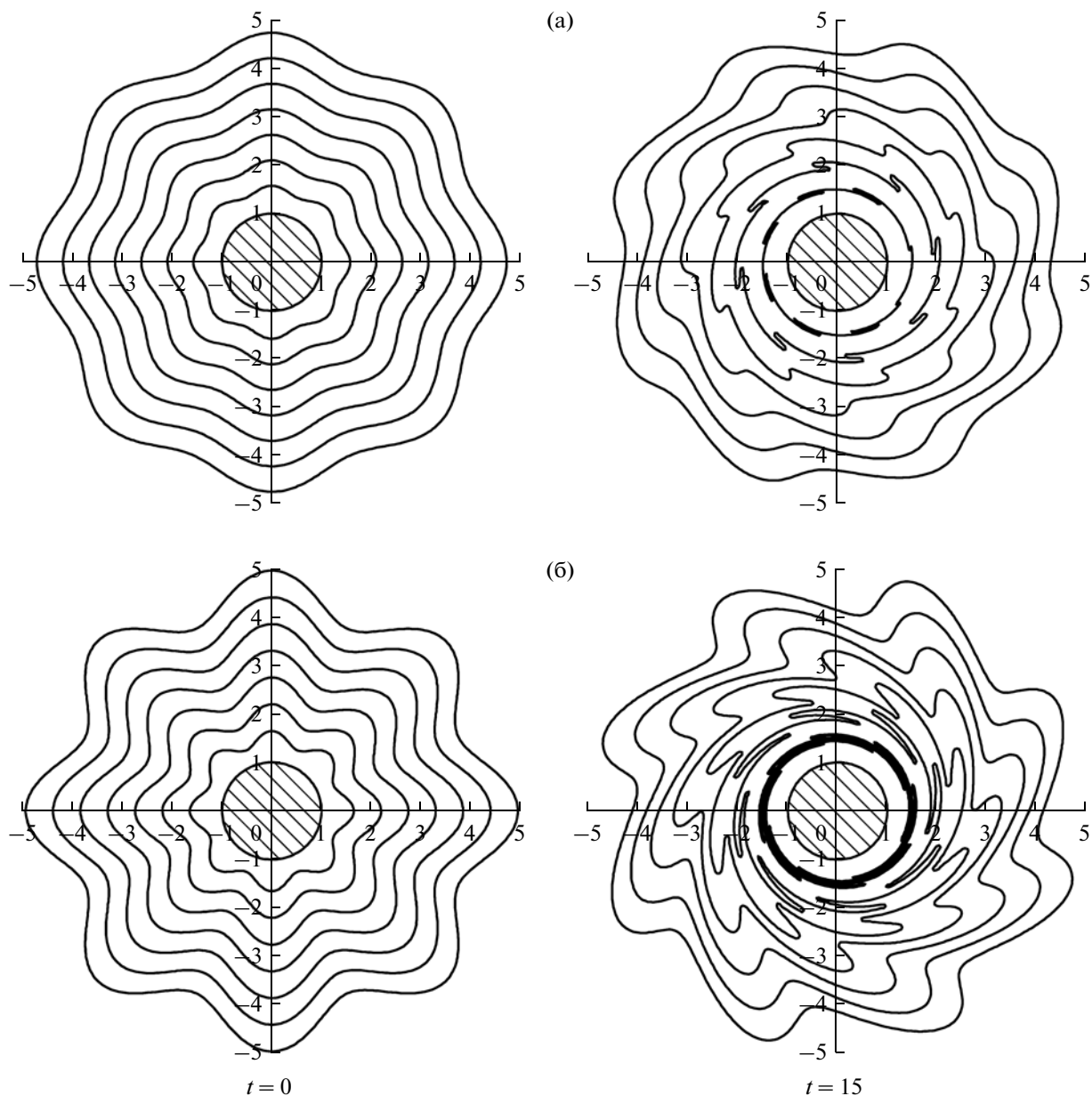
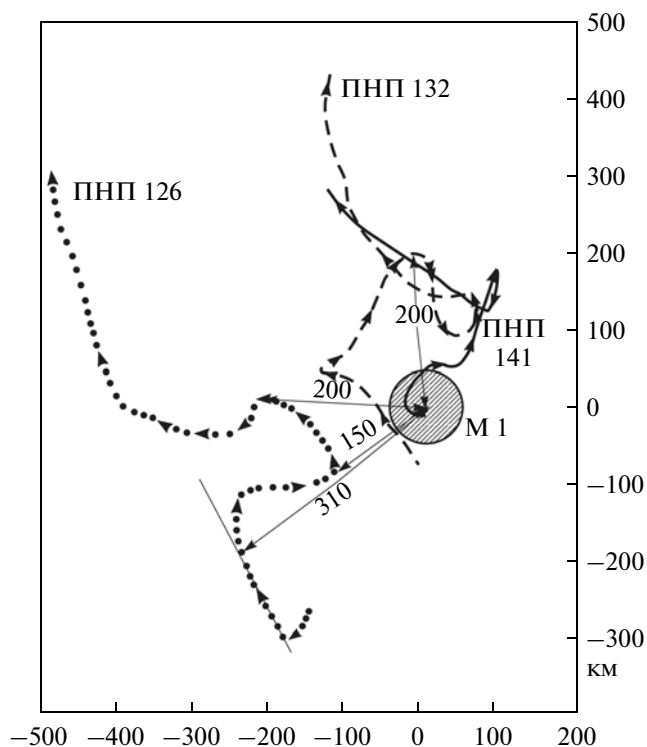


Рис. 2. Иллюстрация воздействия круговой линзы единичного радиуса (заштрихованная область) на окружающих ее семь возмущенных маркерных контуров со средними радиусами  $R$  от 1.5 до 4.5 с шагом 0.5 с амплитудой возмущений  $\Delta = 0.05R$  (а) и  $\Delta = 0.1R$  (б).

Примерно до  $R \sim 4$  можно полагать влияние линзы вполне ощутимым.

В реальном океане трудно проследить поведение ПНП, находящихся вне линзы, но в зоне ее влияния. В работе [12] приведены наблюдения взаимодействия линзы М1 и двух акустических ПНП (рис. 7 в [12] – поплавки 126 и 132). Здесь мы приводим этот рисунок в несколько адаптированном виде (см. рис. 3). Линза М1 радиусом 50 км и толщиной 0.8 км дрейфует в южном направлении на глубинах от 700 до 1500 м со скоростью 1.8 см/с (измерения проводились на гори-

зонте 1100 м), а акустические ПНП на той же глубине перемещаются со скоростью 0.3 см/с в северо-западном направлении на расстояниях около 300 и 60 км от центра линзы М1. Удаленный ПНП (126), достигая широты линзы, описывает петлю, приближаясь к линзе на расстояние до 150 км, затем удаляется на запад более чем на 350 км и как бы возвращается на продолжение начальной траектории. В то же самое время ПНП 132, в начальный момент находившийся вблизи края линзы, описывает сложную траекторию вокруг нее в виде нескольких петель: он удаля-



**Рис. 3.** Траектории трех ПНП 126, 132 и 141, которые проходят близко от линзы М 1, дрейфующей в южном направлении. ПНП 141 был помещен внутрь линзы и, прежде чем покинул линзу, вращался в ней по круговой орбите около 8 месяцев. Стрелки с цифрами показывают расстояния от центра линзы в км (адаптированный рис. 7 из [12]).

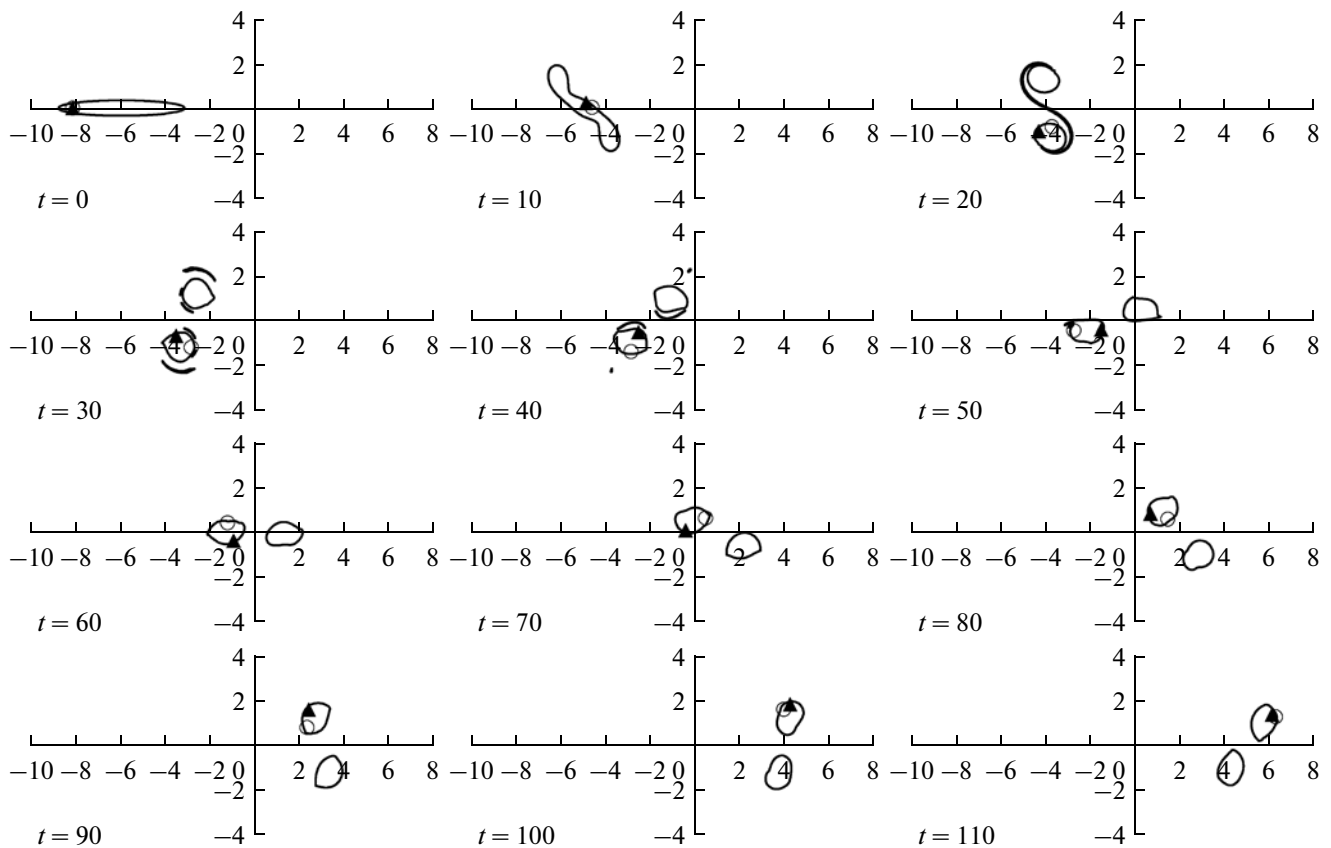
ется на запад и север на 150–200 км, затем приближается с севера на расстояние около 100 км к линзе и, наконец, снова возвращается к дрейфу в северном направлении, противоположном ее движению. Эти наблюдения позволяют отметить, что влияние закрутки со стороны линзы на отдельные внешние ПНП сказывается на расстояниях до  $6R$ . В пределах расстояний, меньших  $3R$ , отмечается сложный характер взаимодействия ПНП с линзой. Качественно такой характер взаимодействия ПНП и линзы в реальном океане подтверждают оценки, полученные на основе анализа наших модельных расчетов (рис. 1 и 2).

Здесь следует отметить обстоятельство, затрудняющее анализ взаимодействия линзы и ПНП. Линза представляет собой единое тело вращения, занимающее объем в слое 700–1500 м и движущееся с интегральной в пределах слоя скоростью. В то же время, ПНП, как правило, помещаются в центр ядра линзы; оказавшись вне линзы, они дрейфуют со скоростью, характерной для горизонта 1100 м. В этом случае характер изменения гидрофизических характеристик по вертикали вне линзы может существенно отличаться, и это

может объяснять факт расхождения направлений дрейфа ПНП и линзы на рис. 3.

Численный эксперимент, результаты которого приведены на рис. 4, имеет следующие цели: 1) сравнить лагранжевы характеристики ПНП (круглый маркер) и «Арго» (треугольный маркер), 2) показать, что для отслеживания сложного характера движения линзы бывает недостаточно одного маркера. Модельные профилографы мы представляем как те же ПНП, но они, в отличие от поплавков, периодически, через каждые 9 суток модельного времени, всплывают в верхний слой и в течение суток движутся с потоком, а затем вновь опускаются в средний слой. Таким образом, на каждой из панелей этого рисунка, начиная с  $t = 10$ , треугольный маркер занимает то место, на которое он попадает после возвращения из верхнего слоя по истечении суточного пребывания в верхнем слое. Маркеры обоих видов искусственно помещены на каждую из панелей рисунка, и в начальный момент времени они находятся в одном положении. Здесь мы представили исходную линзу в виде эллиптического вихревого пятна с отношением полуосей вдоль  $y$ - и  $x$ -направлений, равным  $1/8$ , и поместили маркеры ближе к одному из краев линзы. Такая вытянутая линза, в силу своей неустойчивости, в процессе эволюции делится на две части [3, 4, 9]. На рисунке видно, что после каждого всплытия и возвращения «Арго» все более и более отстает от ПНП, и за расчетное время это отставание накопилось более чем на полный цикл обращения внутри вихревого пятна. Однако можно заключить, что в данном случае оба типа маркеров хорошо отслеживают движение одной части линзы. С другой стороны, этот эксперимент показывает, что вторая часть разделившейся эллиптической линзы осталась за пределами лагранжевых наблюдений. Такого типа возвратные движения «Арго» относительно среднего направления движения круговой линзы были отмечены по измерениям на разрезе солёности в слое 0–2000 м по данным зондирования «Арго» за период с 17 января по 4 сентября 2005 г. [1]. Так, на рис. 6б в работе [1] показано, что линза дрейфует вдоль Марокканского побережья, а зондирование от 28 марта оказалось на 30 км южнее, чем последующее — от 7 апреля. Таким образом, следует вывод, что для мониторинга за сложным движением линз, подверженных частичному разрушению, необходимо помещать в ее тело несколько маркеров.

Следующая серия расчетов (рис. 5) частично восполняет указанный недостаток. Здесь внутри первоначально круглой линзы мы поместили два поплавка, и после того как линза, в результате взаимодействия с подводным препятствием, разрушилась, по существу, на две части, в каждой из них осталось по маркеру, отслеживающему перемещение своего вихревого пятна. Вне наблюде-

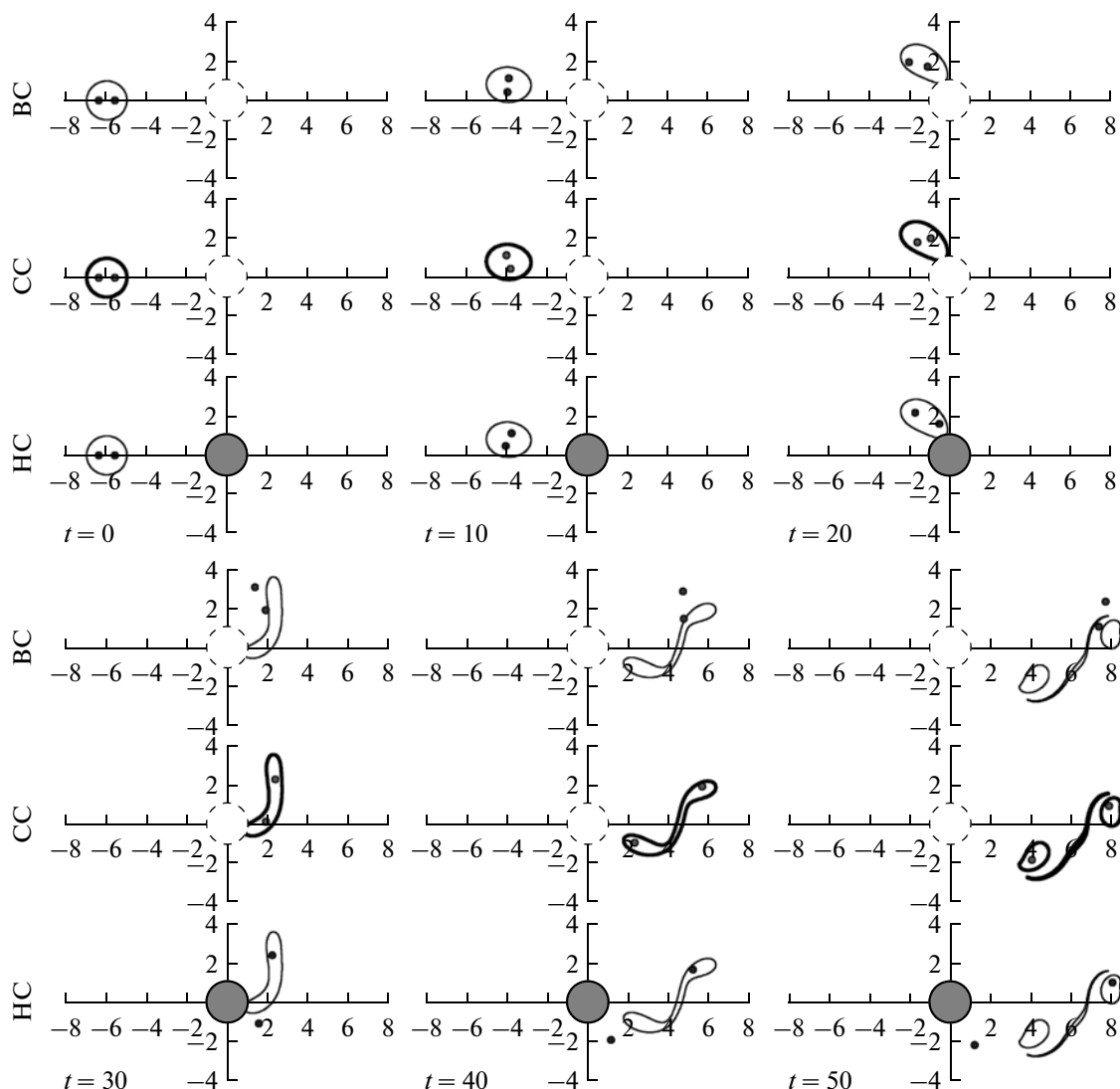


**Рис. 4.** Мгновенные конфигурации первоначально эллиптической линзы (жирные замкнутые линии) в указанные моменты безразмерного времени и положения модельных ПНП (светлые кружки) и Арго (темные треугольники) в баротропном зональном потоке восточного направления.

ний здесь осталась лишь вихревая нить, образовавшаяся в средней области между компактными частями линзы. На ее долю приходится менее 8% объема первоначального вихревого пятна. В динамическом отношении она играет очень слабую роль и со временем довольно быстро размывается. Подводная возвышенность цилиндрической формы здесь невысокая (в размерных переменных ее высота составляет 800 м), а ее радиус равен радиусу линзы. На всех панелях рисунка на ее присутствие в нижнем слое указывает неподвижное темное круговое пятно. В среднем и верхнем слоях его внешняя граница изображена штриховой линией; мнимые отражения контуров линз в верхнем и нижнем слоях изображены тонкими линиями. Кроме того, в поверхностном и придонном слоях мы поместили ПНП, горизонтальные координаты которых в начальный момент времени совпадают с положениями поплавков в линзе. Основные результаты этого эксперимента следующие: 1) поведение поплавков в верхнем слое показывает, что, по крайней мере, на первом этапе движения, они вполне адекватно отражают особенности перемещения линзы (это косвенно подтверждает приведенные в [4, 9] соображения

об отображении линз на поверхности океана), но со временем связь между их траекториями и линзой ослабевает; 2) поплавки в нижнем слое значительно хуже соответствуют движениям линзы, поскольку они сильнее подвержены захватывающему воздействию донной топографии; 3) два или более (что желательно) ПНП или “Арго”, помещенных в линзу, могут служить достаточно надежными лагранжевыми маркерами для исследования перемещения линз даже в случае их частичного разрушения. Отчасти этот модельный результат подтверждается поведением траектории линзы М2 при ее столкновении с горой [5, 6, 12] и направлением движения ПНП в эксперименте AMUSE [11] при их прохождении над системой гор Подкова. В работе [14] в результате совместного анализа приведенных в [11] наблюдений ПНП и полученных результатов численного моделирования было показано, что в условиях сложного донного рельефа для описания характера разрушения линз необходимо увеличивать число ПНП, помещенных внутрь отдельных вихрей.

В океанских условиях встреча буя “Арго” с линзой носит случайный характер. Только около 20% работающих в Северной Атлантике буев “Ар-



**Рис. 5.** Мгновенные конфигурации первоначально круговой линзы (жирные замкнутые линии) и ее «отражений» (тонкие линии) в верхнем и нижнем слоях, а также положения двух ПНП (темные кружки) в каждом из слоев в зональном потоке, набегающем на расположенное в нижнем слое круговое подводное препятствие (пояснения – в тексте). На каждой панели, для указанных моментов времени, горизонтальные сечения верхнего (BC), среднего (CC) и нижнего (HC) слоев расположены сверху вниз соответственно.

го» зафиксировали линзы [1]. В том случае, когда буй захватывается линзой, он определяет ее положение в пространстве, изменение температуры и солености по глубине, но только в той части вихря, где произошло зондирование. Полных геометрических и термохалинных характеристик линзы эти наблюдения не дают. Поэтому крайне важно использовать методы моделирования, чтобы оценить информативность этих наблюдений при исследовании динамики внутритермоклинных вихрей.

Кроме того, численное моделирование позволяет более четко определить ожидаемые результаты экспериментальных исследований динамики внутритермоклинных вихрей в конкретных районах океана. Предварительные результаты расче-

тов позволяют сформулировать требования к наблюдениям с помощью спутниковой альтиметрии, прямых наблюдений скоростей течений как в самой линзе, так и вне зоны ее влияния с помощью ПНП, «Арго» и измерителей скорости течения ADCP [7].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 13-01-12404, № 13-05-00463 и № 14-05-00070).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демидов А.Н., Филюшкин Б.Н., Кожелупова Н.Г. Обнаружение средиземноморских линз в Атлантическом океане по измерениям профилографов про-

- екта “Арго” // *Океанология*. 2012. Т. 52. № 2. С. 190–199.
2. Соколовский М.А. Моделирование трехслойных вихревых движений в океане методом контурной динамики // *Изв. АН СССР. Физ. атм. и океана*. 1991. Т. 27. № 5. С. 550–562.
  3. Филошкин Б.Н., Соколовский М.А., Кожелупова Н.Г., Вагина И.М. О динамике внутритермоклинных линз // *Докл. РАН*. 2010. Т. 434. № 5. С. 688–691.
  4. Филошкин Б.Н., Соколовский М.А., Кожелупова Н.Г., Вагина И.М. Отображение внутритермоклинных вихрей на поверхности океана // *Докл. РАН*. 2011. Т. 439. № 1. С. 118–121.
  5. Филошкин Б.Н., Соколовский М.А., Кожелупова Н.Г., Вагина И.М. Эволюция внутритермоклинных вихрей при прохождении над подводной возвышенностью // *Докл. РАН*. 2011. Т. 441. № 6. С. 825–828.
  6. Armi L., Hebert D., Oakey N. et al. Two years in the life of a Mediterranean salt lense // *J. Phys. Oceanogr.* 1989. V. 19. № 3. P. 354–370.
  7. Bashmachnikov I., Carton X. Surface signature of Mediterranean water eddies in the Northeastern Atlantic: effect of the upper ocean stratification // *Ocean Sci.* 2012. V. 8. P. 931–943.
  8. Carton X., Danialt N., Alves J. et al. Meddy dynamics and interaction with neighboring eddies southwest of Portugal: Observations and modeling // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. C06017. DOI: 10.1029/2009JC005646.
  9. Filyushkin B.N., Sokolovskiy M.A. Modeling the evolution of intrathermocline lenses in the Atlantic Ocean // *J. Mar. Res.* 2011. V. 69. № 2–3. P. 191–220.
  10. Koshel K.V., Ryzhov E.A., Zhmur V.V. Diffusion-affected passive scalar transport in an ellipsoidal vortex in a shear flow // *Nonlin. Processes Geophys.* 2013. V. 20. № 4. P. 437–444.
  11. Richardson P.L., Bower A.S., Zenk W. Summary of meddies tracked by floats // *Int. WOCE Newslett.* 1999. V. 34. P. 18–20.
  12. Richardson P.L., Walsh D., Armi L. et al. Tracking three meddies with SOFAR floats // *J. Phys. Oceanogr.* 1989. V. 19. № 3. P. 371–383.
  13. Richardson P.L., Wooding C.M. RAFOS float trajectories in meddies during the Semaphore Experiment, 1993–1995 // Woods Hole Oceanographic Institute. WHOI-99-05. Technical Report. 1999. 94 p.
  14. Sokolovskiy M.A., Filyushkin B.N., Carton X.J. Dynamics of intrathermocline vortices in a gyre flow over a seamount chain // *Ocean Dynamics*. 2013. V. 63. № 7. P. 741–760.
  15. Stammer D., Hinrichsen H.-H., Käse R.H. Can meddies be detected by satellite altimetry? // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. № C4. P. 7005–7014.
  16. Zhmur V.V., Ryzhov E.A., Koshel K.V. Ellipsoidal vortex in a nonuniform flow. Dynamics and chaotic advections // *J. Mar. Res.* 2011. V. 69. № 2–3. P. 435–461.

## Lagrangian Methods for Observation of Intrathermocline Eddies in the Ocean

B. N. Filyushkin, M. A. Sokolovskiy, N. G. Kozhelupova, I. M. Vagina

Intrathermocline anticyclonic eddies of Mediterranean origin are regularly met in the Eastern part of the Atlantic Ocean. These vortices are identified both from a satellite as changes in altimetry and temperature of the ocean surface, and according to the neutral buoyancy floats (NBF), placed in the lens body.

In this paper, in the framework of a three-layer quasi-geostrophic model, using the method of contour dynamics, we consider some theoretical aspects of lens movements, observed by acoustic NBF and freely drifting buoys of the project “Argo.” These direct experimental observations of the lenses' drift in the North Atlantic qualitatively confirmed the results of our numerical experiments. In particular, it is shown that the lens spin has an advective influence on the behavior of NBF at distances of several lens radii.