

УДК 551.465.42

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ СИНОПТИЧЕСКИМИ ВИХРЯМИ И ВНУТРИТЕРМОКЛИННЫМИ ЛИНЗАМИ

© 2015 г. М. А. Соколовский<sup>1,2</sup>, Б. Н. Филошкин<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт водных проблем РАН, Москва

e-mail: sokol@aqua.laser.ru

<sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

e-mail: borisfil@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.05.2015 г.

В северо-восточной части Атлантического океана на глубинах 600–1600 м наблюдаются внутритермоклинные линзы. Они представляют собой локализованные вихревые пятна (антициклонические и циклонические), как правило, эллиптической формы с горизонтальными осями от 40 до 100 км и вертикальными осями от 0.4 до 1 км и объемами от 1000 до 3500 км<sup>3</sup>. Наблюдения показывают, что типичной является ситуация, при которой в некоторой области океана одновременно могут существовать несколько линз. Таким образом, проблема их взаимодействия и, в частности, воздействия линз на вихри больших масштабов, очень важна. Целью данной работы является исследование механизмов взаимодействия между внутритермоклинными вихрями и синоптическими круговоротами, охватывающими отдельные слои, в рамках трехслойной квазигеострофической модели. Модельные эксперименты показали, что под действием внутритермоклинных линз синоптические вихри существенно меняют свою форму. Предложен возможный механизм торможения линз за счет взаимодействия с синоптическими вихрями, расположенными на разных горизонтах. Очевидно, при разрушении вихрей происходит интенсификация турбулентного обмена на промежуточных глубинах океана.

DOI: 10.7868/S0030157415050160

### ВВЕДЕНИЕ

В северо-восточной части Атлантического океана на глубинах 600–1600 м наблюдаются внутритермоклинные линзы (ВТЛ). Они представляют собой локализованные вихревые пятна (антициклонические и циклонические), как правило, эллиптической формы с горизонтальными осями от 40 до 100 км и вертикальными осями от 0.4 до 1 км и объемами от 1000 до 3500 км<sup>3</sup>. Эти линзы, заполненные средиземноморскими водами (СМВ), легко определяются в океане по высоким значениям температуры и солёности, как природные трассеры [11, 13, 22]. Отличие характеристик в ядре линзы от окружающих вод может меняться в пределах 1–4°C по температуре и 0.3–1.0 епс по солёности в зависимости от удаленности их от района формирования. Это дает возможность определять как их положение в океане, так и геометрические размеры жидких объемов и исследовать их эволюцию на всех стадиях жизни вплоть до разрушения [12].

Обычно в районе каньонов формируются дипольные системы из двух вихрей. Время жизни циклонических вихрей составляет от полугода до года. Разрушаясь, они несколько увеличивают среднюю солёность практически во всем районе своего пребывания. Антициклонические вихри

(линзы) в среднем живут 4–5 лет и играют определяющую роль в переносе тепла и соли на промежуточных глубинах океана. Именно эти вихри определяют солёность языка СМВ на больших удалениях от источника их поступления. ВТЛ встречаются на западе вплоть до срединно-атлантического хребта и по широте от 20° с.ш. (линзы “МЕЗОПОЛИГОН” [3]) до 45° с.ш. (линза “Улла” [21]). При этом надо иметь в виду, что на этой акватории одновременно может существовать приблизительно 75–100 линз [18]. Таким образом, можно выделить два района: (1) Кадисский залив и область, прилегающая к Иберийскому полуострову, где одновременно присутствуют антициклонические и циклонические вихри на промежуточных глубинах; (2) Открытая часть Атлантического океана, где наблюдаются, как правило, антициклонические ВТЛ на глубинах 600–1600 м.

Следует отметить, что изолированные ВТЛ, содержащие воды с аномальными свойствами, встречаются во многих районах Мирового океана от глубин 200–500 м до 3000 м. Подробный анализ региональных исследований [1] показал важность учета всех механизмов образования, распространения линз и их роли в формировании промежуточных свойств. Но в данной работе в основном

привлекаются наблюдения над динамикой и эволюцией ВТЛ средиземноморского происхождения.

Наблюдения показывают, что типичной является ситуация, при которой одновременно могут наблюдаться несколько линз в ограниченной области. Таким образом, проблема их взаимодействия важна. Однако в большинстве работ, и в частности, в статье [14] рассматривается лишь воздействие внешних факторов (стационарное течение, острова, подводные горы) на поведение линз, но не уделяется внимания *воздействию* самих линз на внешние динамические структуры. Исключение составляют лишь работы, в которых обсуждается проявление линз на поверхности океана [8, 15, 16, 17] и недавняя работа [10], в которой исследуется динамика буев нейтральной плавучести, помещенных как внутри линзы, так и вне нее. Однако прямое воздействие линз на вихревые структуры больших масштабов до сих пор не исследовалось.

Целью данной работы является исследование механизмов взаимодействия между внутритермоклинными и синоптическими вихрями в рамках модели трехслойного океана. Линзы располагаются в среднем слое, а мезомасштабные круговороты сосредоточены либо в верхнем слое, либо в верхнем и нижнем слоях. Хотя натурные наблюдения за линзами показывают их существенную изменчивость по вертикали, мы полагаем, что процессы, которые обсуждаются в данной работе, вполне адекватно описываются моделью с кинематически-однородными вихревыми пятнами в каждом из трех слоев.

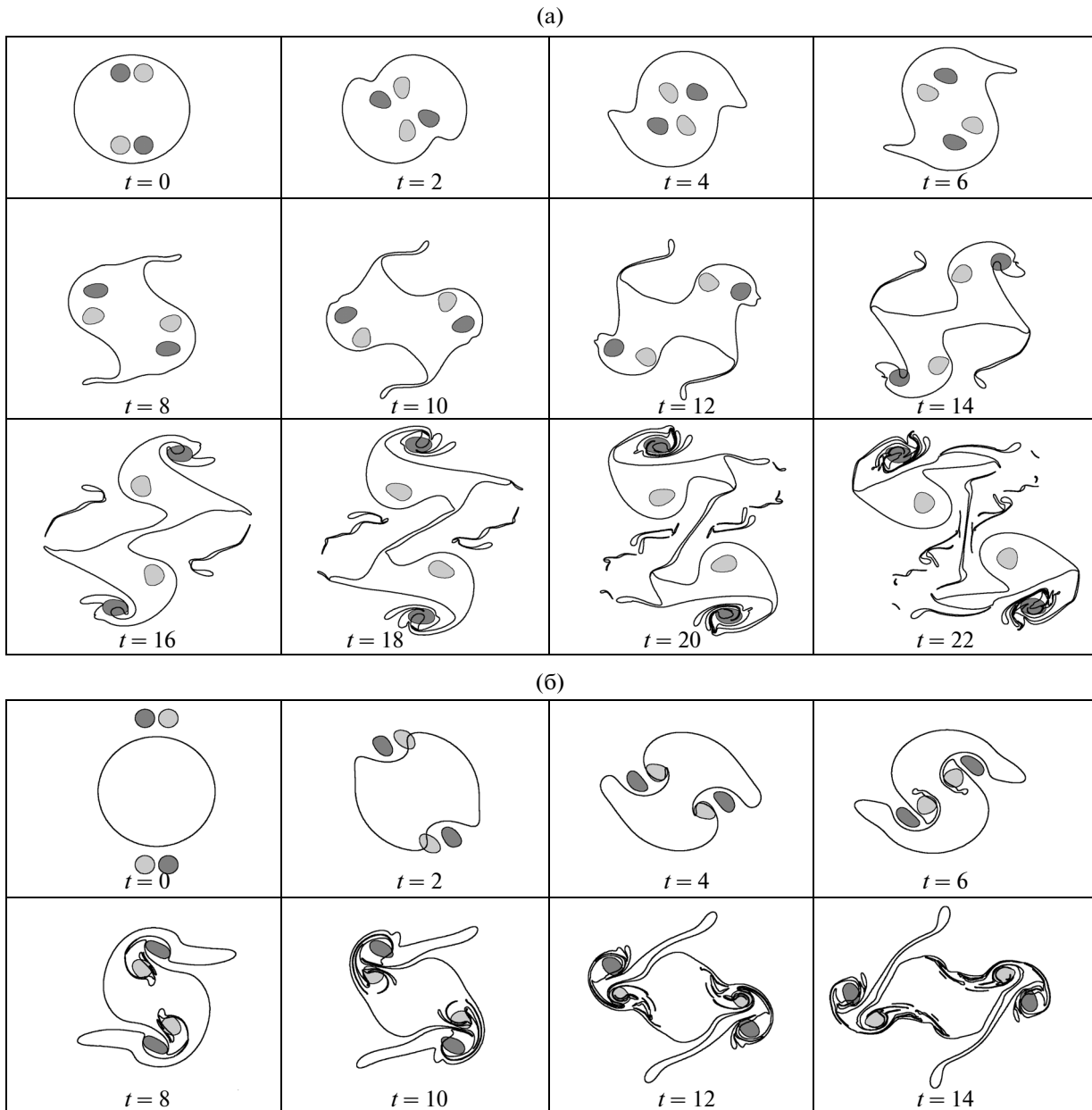
**Наблюдения за линзами в океане.** ВТЛ средиземноморского происхождения обнаруживаются по гидрологическим съемкам [11], а также по наблюдениям профилографов глобального проекта АРГО [2] по более высоким значениям температуры и солёности. Наиболее полные наблюдения над динамикой распространения СМВ, формированием дипольных вихревых структур, их перемещением и взаимодействием между циклонами и антициклонами в районе Кадисского залива и прилегающих с запада областей Иберийского полуострова были выполнены в рамках экспериментов SEMANE – 1999–2001 [16, 17], MEDTOP [11, 19, 24], ARCANE [21] и POMME [20]. По результатам двух первых проектов были получены убедительные натурные свидетельства существенной роли ВТЛ в процессах перемешивания и обмена свойствами на промежуточных глубинах. Подтверждена правомерность рассмотрения вихрей разного знака, как сплошных тел вращения в среднем слое (600–1600 м) и возможность сканирования их проявлений на поверхности океана при альтиметрических измерениях со спутников. Наблюдались также сложные взаимодействия, например, между тремя вихрями разного знака [16], или двумя дипольными системами на фоне цик-

лонического круговорота в среднем слое [19]. Поскольку прямых измерений скорости этого круговорота не проводилось, то оценить его влияние на характер взаимодействия дипольных структур, возможно, удастся хотя бы качественно в модельных экспериментах (рис. 1–3).

В рамках эксперимента ARCANE в апреле 1997 г. вблизи северо-западнее Иберийского полуострова (45° с.ш., 11.5° з.д.) была обнаружена ВТЛ “Улла” [21]. Она располагалась на глубине 600–1700 м и имела диаметр 50–60 км. Наблюдения лагранжевыми поплавками за перемещением линзы велись в течение 18 месяцев, из них 11 месяцев она испытывала лишь небольшие смещения над подводной горой Шарко на уровне 3500 м над вершиной. Только через 360 дней, находясь в зоне влияния горы Шарко, линза начинает движение к юго-западу, и через 150 дней, продрейфовав до широты 42.5° с.ш., она попадает в локальный циклонический круговорот диаметром около 100 км, а затем в течение 100 дней практически параллельным курсом обратно возвращается к северу до 44° с.ш. (рис. 12 в [21]). Анализ имеющихся наблюдений, а также дополнительных измерений с помощью ПНП на глубинах 400–600 м и 1000–1500 м, в прилегающем к линзе районе, не позволил объяснить особенности поведения этого вихря, в частности, длительное нахождение над банкой Шарко на начальной стадии наблюдений. Исследования средней и мезомасштабной циркуляции в слое 0–500 м к западу от банки Шарко в рамках проекта POMME [20] показали существование зон циклонической и антициклонической активности синоптических масштабов. Учитывая, что этот район большую часть года находился под действием проходящих Атлантических атмосферных циклонов, можно предположить, что над банкой Шарко в верхнем слое регулярно возникали и существовали относительно устойчивые циклонические вихри. Эта особенность циркуляции вод в верхнем слое позволяет объяснить поведение линзы над банкой в модельном эксперименте (см. рис. 3).

**Численное моделирование взаимодействия вихрей.** Численные расчеты, результаты которых приведены в этом разделе, проведены в рамках трехслойной квазигеострофической модели на  $f$ -плоскости со следующими параметрами, характерными для условий Северной Атлантики: общая глубина составляет 4 км, толщины верхнего, среднего и нижнего слоев равны  $H_1 = 600$ ,  $H_2 = 1000$  и  $H_3 = 2400$  м соответственно, а первый и второй радиусы деформации [4] принимают значения  $Rd_1 = 32$  км и  $Rd_2 = 15$  км [25].

Результаты расчетов представлены в виде последовательности контуров вихревых пятен в слоях. Использовалась трехслойная версия метода контурной динамики (МКД) [6, 7], предполагаю-

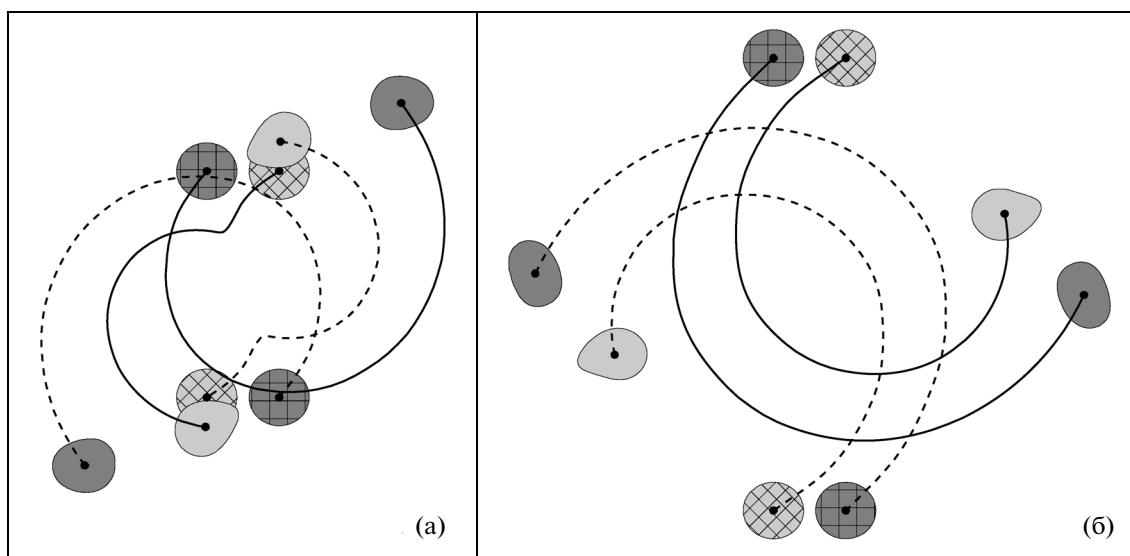


**Рис. 1.** Эволюция вихревой структуры, состоящей из синоптического циклонического вихря верхнего слоя (его контур изображен сплошной линией) и двух пар ВТВ, принадлежащих среднему слою и расположенных под ним (светлые пятна – циклоны, темные пятна – антициклоны). Цифровые подписи указывают безразмерные моменты времени. При  $t = 0$  центр циклона верхнего слоя расположен в начале системы координат  $(0, 0)$ , а центры четырех вихрей среднего слоя имеют координаты: (а)  $(\mp 1.2; -4)$  и  $(\pm 1.2; 4)$ , (б)  $(\mp 1.2; -8)$  и  $(\pm 1.2; 8)$ . Верхний знак всюду относится к антициклонической ВТЛ, а нижний – к циклонической.

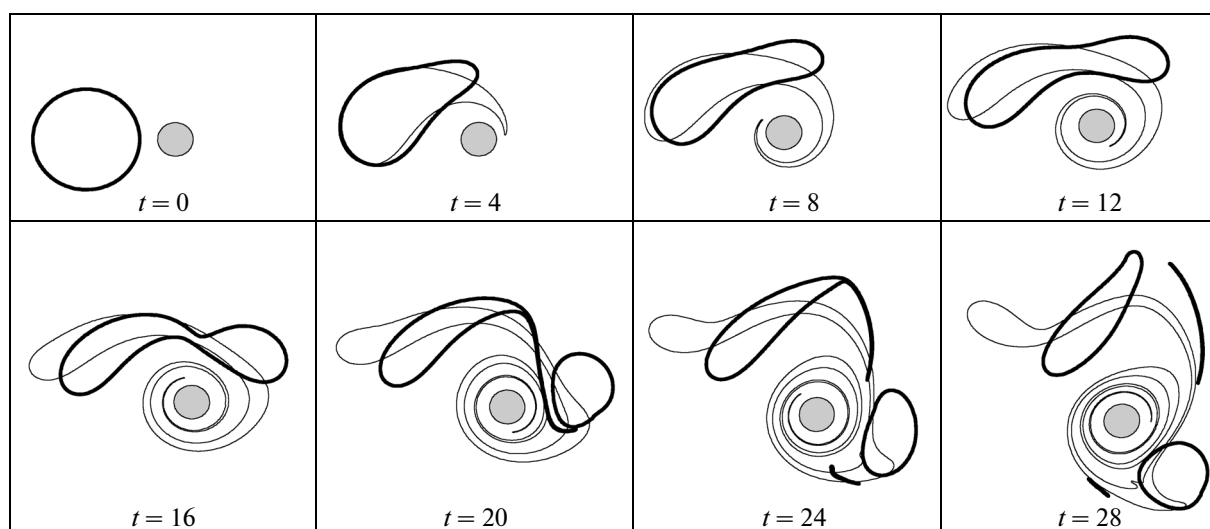
шей, что потенциальные завихренности (ПЗ)  $q_j (j = 1, 2, 3)$  в слоях имеют кусочно-постоянное распределение  $q_j = \sum_{j=1}^{N_j} q_{ij}$ , такое, что  $q_{ij}$  (первый индекс задает номер вихревого пятна, а второй номер слоя) являются константами внутри некоторых компактных областей с площадями  $S_{ij}$  и равны нулю вне них, т.е. представляют собой вихревые пятна,  $N_j$  – это количество вихревых пятен в  $j$ -м слое.

Отметим, что при взаимодействии вихревых пятен ключевую роль играет не локальная потенциальная завихренность  $q_{ij}$ , а “эффективная” ПЗ, равная произведению  $q_{ij} S_{ij} H_j$ , которое будем обозначать через  $\Pi_{ij}$ .

В этой модели под внутритермоклинным вихрем (циклоном или антициклоном) будем понимать сосредоточенное в среднем слое вихревое пятно с постоянным положительным или отри-



**Рис. 2.** На панелях (а) и (б) представлены расположения пар ВТВ при  $t = 0$  (вихревые пятна заштрихованы) и при  $t = 14$  для случаев, представленных на рис. 1 (а) и 1 (б) соответственно. Сплошные линии изображают траектории движения центров вихрей, изначально расположенных в верхней части рисунка, а штриховые – в нижней части.



**Рис. 3.** Эволюция вихревой структуры, состоящей из циклонического вихря верхнего слоя, антициклонического вихря нижнего слоя радиуса 3. В начальный момент времени центры синоптических вихрей расположены в точках  $(x_{01}, y_{01}) = (x_{03}, y_{03}) = (0, 0)$  (их контуры изображены толстой и тонкой линиями соответственно), а линза единичного радиуса (серое пятно) имеет центр  $(x_{02}, y_{02}) = (5, 0)$ . Второй нижний индекс всюду характеризует номер слоя.

пательным значением потенциальной завихренности соответственно.

Линейный пространственный масштаб примем равным  $Rd_1$ , в качестве временного масштаба  $T^*$  примем ротационный период вращения первоначально кругового вихревого пятна вокруг его центра в отсутствие внешнего поля. Так, если предположить, что максимальная скорость, достигаемая на круговом контуре вихря единичного радиуса (напомним, что безразмерной единице

длины отвечает 32 км), составляет 40 см/с, то получаем  $T^* \approx 9$  суток.

Первые два численных эксперимента демонстрируют особенности взаимодействия расположенного в верхнем слое синоптического циклонического вихря радиуса  $R = 6$  с двумя парами ВТЛ единичных радиусов, локализованных в среднем слое. Таким образом, в данном случае  $N_1 = 1$  и  $N_2 = 4$ . В размерных переменных радиусы поверхностного циклона и каждой ВТЛ со-

ставляют 192 и 32 км соответственно. Пусть циклон верхнего слоя представляет собой относительно мощное вихревое образование, а ВТЛ среднего слоя таковы, что их суммарная эффективная потенциальная завихренность меньше, чем ПЗ циклона. Возьмем, например, следующие безразмерные величины:  $\Pi_1 \equiv \Pi_{11} = 5.4$  и  $\Pi_{12} = -\Pi_{22} = \Pi_{32} = -\Pi_{42} = -1.25$ .

Пусть в первом случае (рис. 1а) все ВТЛ в начальный момент времени в проекции сверху находятся под поверхностным циклоном, а во втором (рис. 1б) — вне него, причем их начальное расположение, симметричное относительно поворота на  $180^\circ$ , инициирует встречное лобовое столкновение. При этом в случае отсутствия циклона верхнего слоя после начальной стадии сближения пары вихрей были бы должны обмениваться партнерами, а вновь образованные пары разбежаться в противоположные стороны вдоль направлений, перпендикулярных первоначальному движению (известная задача Гринхила [5]). Очевидно (и это показывают рис. 1а и 1б), воздействие циклонического вихря верхнего слоя существенно изменяет эту картину. На этих рисунках в каждой из панелей представлены мгновенные конфигурации контуров всех вихревых пятен (предполагается, что жидкость верхнего слоя “прозрачна”, и закрашенные вихревые пятна среднего слоя видны сверху) в указанные моменты безразмерного времени, и, таким образом, в размерных переменных здесь временной интервал между соседними изображениями составляет 18 суток.

Видно, что в обоих случаях встречное движение вихревых пар сопровождается вращением всей вихревой структуры против часовой стрелки, индуцированным вращением поверхностного циклона. В первом случае, когда вихревые пары размещены под циклоном, обмен партнерами между парами, первоначально расположенными в верхней и нижней частях рисунка, происходит на интервале между  $t = 2$  и  $t = 4$ : в одну из новых пар объединяются те вихревые пятна, что изначально были в правой части панели, а во вторую — пятна левой части. В дальнейшем они, продолжая общее вращение в циклоническом направлении, разбегаются вдоль спиралеобразных траекторий. Во втором случае, когда вихревые пары расположены вне границ циклона верхнего слоя, они остаются неделимыми вихревыми структурами, и продолжают равномерно удаляться друг от друга также по спиральным траекториям. Отличия этих сценариев наглядно демонстрируются рис. 2, где для обоих случаев показаны как положения ВТЛ в начальный момент времени и при  $t = 14$ , так и непрерывные траектории центров вихрей.

Наиболее примечательным, на наш взгляд, результатом является факт воздействия линз на цик-

лон верхнего слоя. Несмотря на то, что эти вихревые структуры разнесены в вертикальном направлении, воздействие ВТЛ на поверхностный циклон является существенным. В обоих случаях первоначально круговые формы контуров циклонов значительно деформируются, образуются затяжки и вихревые нити, участвующие в общем вращении всей двухслойной вихревой структуры в циклоническом направлении. Компактные части циклона оказываются сосредоточенными над циклоническими ВТЛ, антициклонические линзы также формируют над собой некоторую “крышу” из филаментов поверхностного циклона. Отметим, что в первом случае циклон верхнего слоя за расчетное время (около 200 суток) фактически полностью разрушился, разделившись на две крупные части и множество мелких.

Следующий эксперимент, представленный на рис. 3, показывает результат взаимодействия одиночной линзы с двумя синоптическими вихрями, циклоническим и антициклоническим, помещенными в верхний и нижний слои соответственно. Мы полагаем, что такая конфигурация является типичной для рассматриваемого района Северной Атлантики. Действительно, с одной стороны, как отмечено в предыдущем разделе статьи, существование квазистационарного циклонического круговорота в поверхностных слоях подтверждено инструментально; с другой стороны, рельеф дна в данной области характеризуется большим количеством возвышенностей, что служит источником формирования антициклонической завихренности в нижнем слое. Эти обстоятельства и послужили поводом выбрать в качестве спутников ВТЛ модельную структуру из поверхностного циклона и придонного антициклона. Для простоты модули эффективных ПЗ и радиусы этих вихрей берутся равными ( $R = 3$ , что соответствует 96 км). Линза среднего слоя имеет единственный радиус и расположена сбоку от этой структуры. При таком расположении вихрей в случае, если бы скачки плотностей на границах раздела были равными, то воздействие синоптических вихрей противоположных знаков на линзу было бы полностью уравновешено, и она должна была оставаться неподвижной. В данном случае указанного равенства нет, но, как показывает рис. 3, линза остается практически неподвижной, совершая лишь небольшие отклонения от равновесного положения. При этом вихревые пятна синоптической структуры подвергаются существенным деформациям за счет воздействия на них линзы: циклонический вихрь верхнего слоя делится на две части, каждая из которых участвует во вращении относительно линзы, а антициклон нижнего слоя закручивается вокруг квазистационарной области, которая индуцируется ВТЛ в нижнем слое.

На основе этого эксперимента можно сформулировать гипотезу о возможном механизме

образования застойных зон при движении линз в Северной Атлантике (рисунки 4 и 7 в [19], рисунки 3, 12, 14 и 15 в [21]): **застойные зоны – это области, находящиеся в окрестности границ разнонаправленных поверхностных и придонных вихрей.** Последние могут быть обусловлены действием донной топографии; в частности, антициклонический глубинный вихрь возникает над подводной горой.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детектирование линз с помощью дистанционных методов слежения за поверхностью океана, еще не так давно казавшееся маловероятным [26], уже прочно вошло в океанологическую практику (в частности, [16, 11, 17, 14, 8, 10, 18] и многие другие исследования), поскольку взаимодействие вихревых структур на различных горизонтах является неотъемлемым свойством вихрей в стратифицированной среде. Общая оценка пространственного изменения кинетической энергии вихрей среднего слоя в области распространения СМВ показало значительное ее уменьшение в сторону открытого океана, где частота встречаемости ВТЛ существенно падает [24].

В данной работе с помощью численного моделирования показано, что ВТЛ оказывают существенное воздействие на поверхностные вихри синоптического масштаба, приводя к деформациям их формы вплоть до разрушения на более мелкие структуры. Отметим, что инструментально практически невозможно проследить в океане всю череду этапов взаимодействия ВТЛ с поверхностным циклоном и придонным антициклоном в течение продолжительного времени (рис. 3) или двух заглубленных дипольных структур с циклоном верхнего слоя (рис. 1–2). Мы полагаем, что только синтез результатов натуральных измерений и модельных экспериментов позволит продвинуться в понимании механизмов взаимодействия вихрей разных масштабов.

Проведенные численные эксперименты убеждают, что внутритермоклинные вихри являются важным элементом формирования синоптической изменчивости в океане.

Авторы благодарят Г.М. Резника за полезное обсуждение полученных результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-50-00095).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белкин И.М., Емельянов М.В., Костяной А.Г., Федоров К.Н. Термохалинная структура промежуточных вод океана и внутритермоклинные вихри // Внутритермоклинные вихри в океане. М.: ИО АН СССР, 1986. С. 8–34.

2. Демидов А.Н., Филлюшкин Б.Н., Кожелупова Н.Г. Обнаружение средиземноморских линз в Атлантическом океане по измерениям профилографов проекта “Арго” // Океанология. 2012. Т. 52. № 2. С. 190–199.
3. Иванов Ю.А., Корт В.Г. Программа “МЕЗОПОЛИГОН” // Гидрофизические исследования по программе “МЕЗОПОЛИГОН”. М.: Наука, 1988. С. 3–9.
4. Каменкович В.М., Кошляков М.Н., Монин А.С. Синоптические вихри в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 512 с.
5. Ламб Г. Гидродинамика. М.: Изд-во ОГИЗ, 1947. 929 с.
6. Соколовский М.А. Моделирование трехслойных вихревых движений в океане методом контурной динамики // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1991. Т. 27. № 5. С. 380–388.
7. Соколовский М.А. Устойчивость осесимметричного трехслойного вихря // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1997. Т. 33. № 1. С. 16–26.
8. Филлюшкин 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.
9. Филлюшкин 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.
10. Филлюшкин Б.Н., Соколовский М.А., Кожелупова Н.Г., Вагина И.М. О лагранжевых методах наблюдений за внутритермоклинными вихрями в океане // Океанология. 2014. Т. 54. № 6. С. 688–694.
11. Ambar I., Serra N., Neves F., Ferreira T. Observations of the Mediterranean Undercurrent and eddies in the Gulf of Cadiz during 2001 // J. Marine Syst. 2008. V. 71. № 1–2. P. 195–220.
12. Armi L., Hebert D., Oakey N. et al. Two years in the life of a Mediterranean salt lens // J. Phys. Oceanogr. 1989. V. 19. № 3. P. 354–370.
13. Armi L., Zenk W. Large lenses of highly saline Mediterranean water // J. Phys. Oceanogr. 1984. V. 14. № 10. P. 1560–1576.
14. Baird M.E., Ridgway K.R. The southward transport of sub-mesoscale lenses of Bass Strait Water in the centre of anti-cyclonic mesoscale eddies // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39. L05603. DOI: 10.1029/2011GL050643.
15. Bashmachnikov I., Carton X., Belonenko, T.V. Characteristics of surface signatures of Mediterranean water eddies // J. Geophys. Res. Oceans. 2014. V. 119. DOI: 10.1002/2014JC010244.
16. Carton X., Cherubin L., Paillet J. et al. Meddy coupling with a deep cyclone in the Gulf of Cadiz // J. Mar. Syst. 2002. V. 32. № 1. P. 13–42.
17. Carton X., Daniault N., Alves J. et al. Meddy dynamics and interaction with neighboring eddies southwest of Portugal: Observations and modeling // J. Geophys. Res. Oceans. 2010. V. 115. DOI: 10.1029/2009JC005646.
18. 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.

19. *L'Hégaret P., Carton X., Ambar I. et al.* Evidence of Mediterranean water dipole collision in the Gulf of Cadiz // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2014. V. 119. P. 5337–5359.
20. *Le Cann B., Assenbaum M., Gascard J.-C., Reverdin G.* Observed mean and mesoscale upper ocean circulation in the midlatitude northeast Atlantic // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2005. V. 110. C07S05. DOI: 10.1029/2004JC002768
21. *Paillet J., Le Cann B., Carton X. et al.* Dynamics and evolution of a northern meddy // *J. Phys. Oceanogr.* 2002. V. 32. № 1. P. 55–79.
22. *Prater M.D., Sanford T.B.* A meddy off Cape St. Vincent. Part 1: Description // *J. Phys. Oceanogr.* 1994. V. 24. № 1. P. 15–86.
23. *Richardson P.L., Tychensky A.* Meddy trajectories in the Canary Basin measured during the SEMAPHORE experiment, 1993–1995 // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 25029–25045.
24. *Serra N., Ambar I., Boutov D.* Surface expression of Mediterranean water dipoles and their contribution to the shelf/slope – open ocean exchange // *Ocean Sci.* 2010. V. 6. P. 191–209.
25. *Sokolovskiy M.A., Filyushkin B.N., Carton X.J.* Dynamics of intrathermocline vortices in a gyre flow over a seamount chain // *Ocean Dyn.* 2013. V. 63. № 7. P. 741–760.
26. *Stammer D., Hinrichsen H.H., Käse R.H.* Can meddies be detected by satellite altimetry? // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 7005–7014.

## Interaction between Synoptic Vortices and Intrathermocline Lenses

M. A. Sokolovskiy, B. N. Filyushkin

In the North-Eastern Atlantic, there are observed intrathermocline lenses (ITL), at the depths of 600–1600 m. These ITLs are localized vortex patches (anticyclonic and cyclonic), generally of elliptical shape with horizontal axes from 40 to 100 km, vertical axes from 0.4 to 1 km and volumes of 1000–3500 km<sup>3</sup>. Observations show that the situation when few lenses can exist simultaneously in some ocean area is typical. Thus, the problem of their interaction, and, in particular, the influence of lenses on larger vortices, is especially important. The aim of the present work is studying the interaction between intrathermocline vortices and synoptic gyres existing in some layers in the frames of the three-layer quasigeostrophic model. Simulations show that synoptic vortices change significantly their shape under the effect of ITLs. The authors have proposed a possible mechanism of stagnation of ITLs because of the interaction with synoptic vortices, located in different layers. It is obvious that the turbulent exchange at the middle depths of the ocean intensifies when the vortices collapse.