

УДК 551.465.42

## О ДИНАМИКЕ ВНУТРИТЕРМОКЛИННЫХ ЛИНЗ

© 2010 г. Б. Н. Филошкин, М. А. Соколовский, Н. Г. Кожелупова, И. М. Вагина

Представлено академиком Р.И. Нигматулиным 15.04.2010 г.

Поступило 21.04.2010 г.

Воды Средиземного моря, вытекающие с придонным течением из Гибралтарского пролива, занимают промежуточные глубины восточной части северной половины Атлантического океана на глубинах от 800 до 1500 м [1]. В толще этой водной массы на всем пространстве ее распространения регулярно встречаются антициклонические внутритермоклинные вихри (линзы). Они заполнены также средиземноморскими водами и хорошо выделяются по высоким значениям температуры и солености. Это отличие в ядре линзы от окружающих вод может меняться от 1 до 4°С по температуре и от 0.3 до 1.0 епс по солености в зависимости от удаления линзы от района ее формирования [1]. В то же время влияние линз на поле плотности в значительной степени взаимно скомпенсировано, и ядро линзы характеризуется однородностью воды по плотности. Абсолютные значения условной плотности воды  $\sigma_0$  в ядрах линз изменяются в диапазоне от 27.5 до 28.2, а сами ядра могут располагаться на глубинах от 800 до 1400 м [2].

Имеющийся каталог основных характеристик линз в Атлантическом океане за период 1970–2000 гг. позволил показать характер их пространственного распространения по объему [3]. Оценить реальное число линз в каждый момент времени крайне трудно. Так, по оценке Арми и Зенка [4], линзы покрывают от 4 до 8% площади Канарского бассейна. По нашим оценкам, при условии, что линзы живут не менее трех лет, в радиусе 1800 км от центра каньона Портимао в каждый момент времени может находиться от 150 до 200 линз [2]. Единственная экспериментальная проверка времени жизни линзы приведена в работе [5]. Линза Шарон (M1) прослежена с помощью акустических поплавков в течение двух лет: с октября 1984 г. по октябрь 1986 г. Линза M1 была обнаружена к югу

от Азорской фронтальной зоны и перемещалась почти на юг в течение двух лет. Если принять, что до начала мониторинга линза жила около 2–3 лет, то приходится признать, что линза Шарон (M1) в момент полного разрушения имела возраст около 4–5 лет.

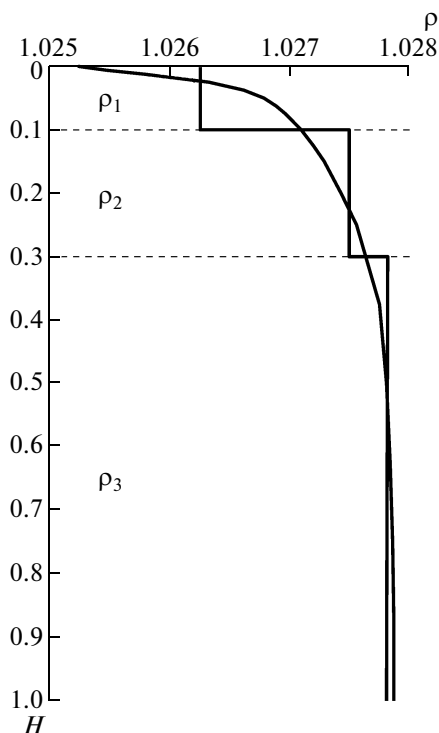
При анализе характера пространственного распространения линз по объему их высокая концентрация отмечена в районе Кадисского залива, мыса Сент-Винсент и в зоне к северу от Азорской фронтальной зоны. В этих районах наблюдаются линзы аномально больших объемов [5]. Возникновение крупных линз в открытом океане на расстояниях до 2000 км от района их образования существенно увеличивает время их жизни и возможности дрейфа на расстояния до 7 тыс. км. Именно долгоживущие линзы, расположенные к юго-западу от Азорской фронтальной зоны, позволяют косвенно подтвердить факт слияния антициклонических вихрей. В качестве примеров можно привести, во-первых, линзу диаметром около 100 км, обнаруженную в 1976 г. в юго-западной части Саргассова моря (25° с.ш., 69° з.д.) на глубинах от 600 до 1300 м. Аномалии температуры и солености в ядре этой линзы составили 2°С и 0.4 епс по отношению к окружающим водам [7]. Во-вторых, линзу в тропической Атлантике (20° с.ш. и 37° з.д.) на глубинах 800–1200 м, диаметром около 70 км с аномалиями температуры до 4°С и соленостью до 1 епс [6].

Приведенные факты дают обоснование для выбора трехслойной квазигеострофической гидродинамической модели идеальной жидкости с постоянными значениями плотности в слоях. В силу геострофического баланса антициклонические (циклонические) вихри среднего слоя имеют вид двояковыпуклых (двояковогнутых) линз. В данной работе исследуется процесс слияния антициклонических линз в рамках такой модели с учетом реального распределения плотности [8] и средних значений пространственных масштабов вихрей [6].

На рис. 1 представлена общая схема такой модели. Сплошная линия представляет собой среднее многолетнее вертикальное распределение плотности для Атлантики [8]. Этот профиль ап-

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова  
Российской Академии наук, Москва*

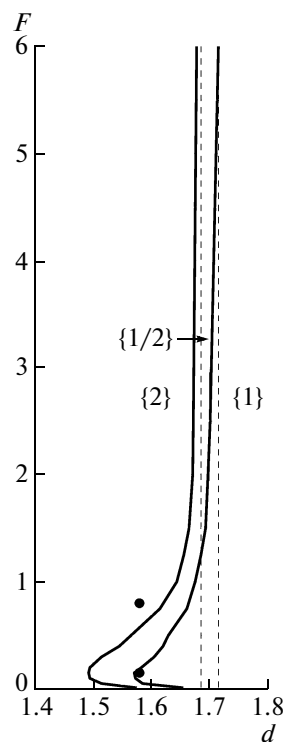
*Институт водных проблем  
Российской Академии наук, Москва  
Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова*



**Рис. 1.** Общая схема трехслойной модели: гладкое непрерывное вертикальное распределение плотности ( $\rho$ ) в Атлантическом океане и кусочно-постоянное в выделенных слоях ( $\rho_1, \rho_2, \rho_3$ ).

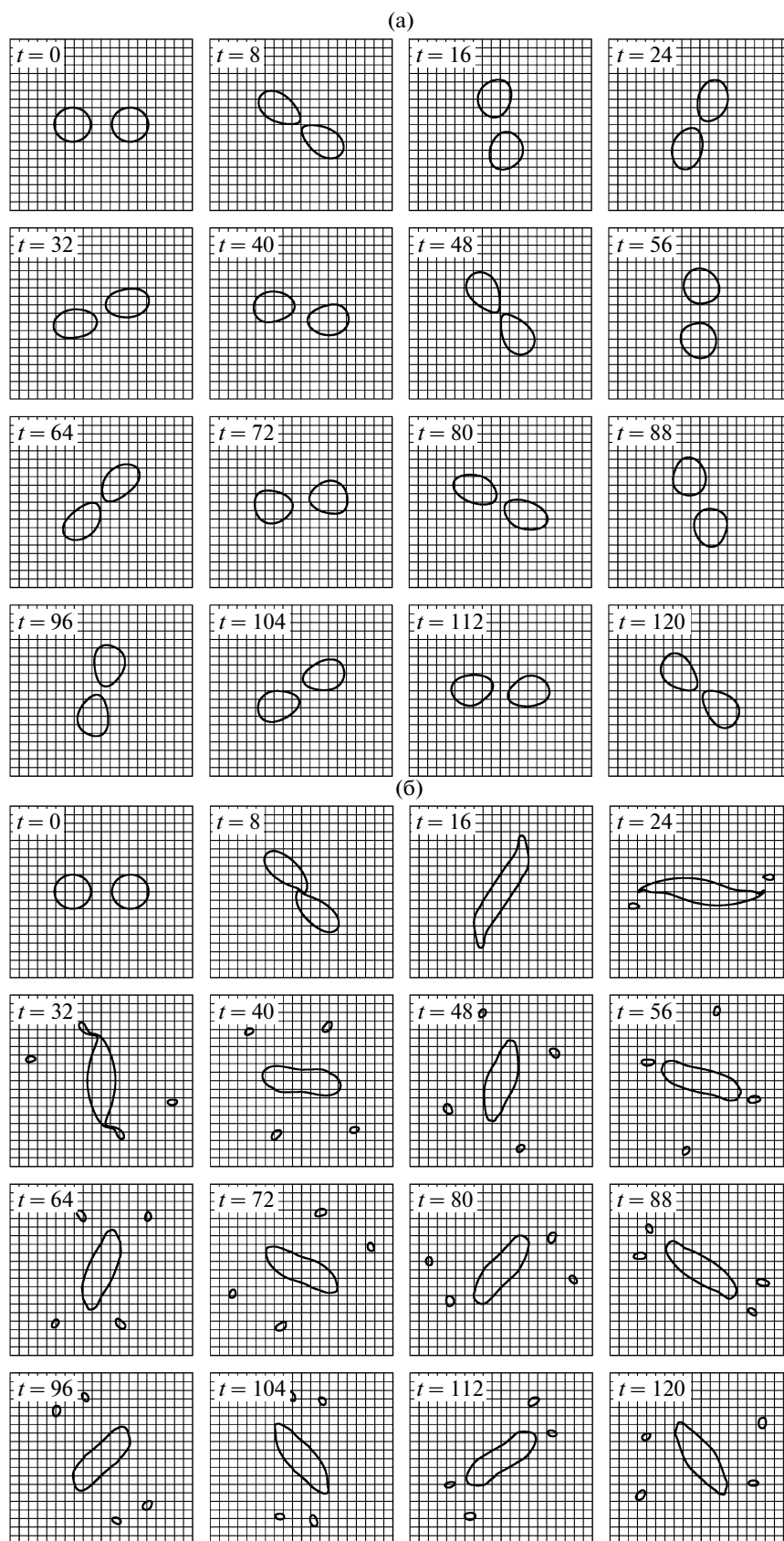
проксимируется двухступенчатой кусочно-постоянной функцией со скачками плотности на границах раздела слоев  $\Delta\rho_1 = \rho_2 - \rho_1$  и  $\Delta\rho_2 = \rho_3 - \rho_2$  такими, что  $\Delta\rho_1/\Delta\rho_2 = 4$ , и безразмерные толщины слоев суть  $h_1 = 0.1$ ,  $h_2 = 0.2$  и  $h_3 = 0.7$ . При таком соотношении между толщинами слоев и глубине океана 5000 м средний слой будет занимать горизонты от 500 до 1500 м. С двумя скачками плотности естественным образом связаны два числа Фруда  $F_n = (fL)^2/g\Delta\rho_n H$ , где  $f$  – параметр Кориолиса, предполагаемый далее постоянным,  $L$  и  $H$  – горизонтальный и вертикальный масштабы длины,  $g$  – ускорение свободного падения. В качестве определяющего выберем параметр  $F \equiv F_1$ , так что в силу принятого выше предположения  $F_2 = 4F$ . Эволюция вихревых пятен среднего слоя в данной работе исследуется с помощью расчетов в рамках трехслойной версии метода контурной динамики (МКД) [9], использующей процедуры “контурной хирургии” [10]. Численные эксперименты позволяют установить критерии слияния двух первоначально круговых линз.

Известно [11], что два точечных вихря одного знака и одинаковой интенсивности всегда вращаются вдоль круговых орбит с постоянной угловой скоростью относительно центра отрезка, соединяющего эти вихри, в направлении, определяемом циклональностью вихрей. Аналогичным об-



**Рис. 2.** Диаграмма различных состояний двух круговых вихревых пятен на плоскости параметров ( $d, F$ ) в баротропной жидкости (штриховые линии) и в среднем слое трехслойной жидкости (сплошные линии): область {1} – нет слияния, область {2} – вихри сливаются, {1/2} – промежуточная область со слиянием и последующим разделением вихрей. Точки соответствуют координатам плоскости указанных параметров, при которых выполнены численные эксперименты, представленные на рис. 3.

разом ведут себя два идентичных распределенных круговых вихря, разнесенных на некоторое расстояние [12]. Однако последние обладают тем свойством, что, будучи расположенными достаточно близко друг к другу, они сливаются. Проблема слияния вихрей одного знака в однородной жидкости (плазме) является одной из фундаментальных в гидромеханике, и ей посвящено большое количество работ. Ключевым является вопрос о критическом расстоянии между центрами вихрей, на котором процесс слияния начинает проявляться. С достаточно большой степенью достоверности установлено, что два цилиндрических круговых вихря единичного радиуса сливаются, если для величины  $d$  (половины расстояния между центрами вихрей) выполняется условие  $d < d^* \sim 1.6-1.7$  [12]. Заметим, что эти результаты для критических значений  $d^*$  получены для вихревых пятен (вихрей с постоянным распределением завихренности) в баротропной жидкости. В рассматриваемом нами случае внутренние вихревые пятна располагаются между двумя “свобод-



**Рис. 3.** Мгновенные конфигурации первоначально круговых вихрей среднего слоя в указанные моменты безразмерного времени ( $t$ ). а – при  $F = 0.15$  и  $d = 1.58$  (нижняя точка на рис. 2); б – при  $F = 0.8$  (верхняя точка на рис. 2).

ными” поверхностями раздела слоев, что, как показывают расчеты, играет принципиальную роль.

На рис. 2 полученный с помощью МКД-расчетов интервал для  $d^* \in [1.69-1.71]$  в баротропном случае изображен штриховой линией. Левее него вихревые пятна всегда сливаются, а правее не сливаются. Внутри интервала наблюдается кратковременное либо периодическое слияние с последующим разделением. Для антициклонических линз поведение соответствующих границ раздела режимов (сплошная линия) иное: при больших значениях  $F$  имеем по существу баротропный предел, а на интервале изменений параметра  $F$  от 0 до  $\sim 1.5$  распределение имеет немонотонный характер по параметру  $F$  с минимумом при  $F \approx 0.15$ . Принимая  $f = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ,  $g = 10^3 \text{ г} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^{-2}$ ,  $H = 5 \cdot 10^5 \text{ см}$ ,  $\Delta\rho_1 = 4/5\Delta\rho = 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$  и  $F = 0.15$ , получаем, что вихри, наименее подверженные слиянию, имеют характерный радиус  $L = 4.24 \cdot 10^6 \text{ см} = 42.4 \text{ км}$ .

На рис. 3а приводится пример поведения аномально близко расположенных друг к другу линз ( $d = 1.58$ ) при  $F = 0.15$  (нижняя точка на рис. 2), когда вихревые пятна вращаются относительно общего центра завихренности без слияния. Как показывает рисунок, вихревые пятна периодически сближаются и удаляются подобно тому, как это происходит при взаимодействии Aska medies B1 и B2 [13].

На рис. 3б демонстрируется пример сценария со слиянием вихрей при всех тех же внешних параметрах за исключением изменившегося числа Фруда (теперь  $F = 0.8$  и, соответственно,  $L = 98.0 \text{ км}$ , — верхняя точка на рис. 2). Получившаяся в результате слияния первоначально круговых пятен вихревая структура имеет вид пульсирующей квазиэллиптической линзы, вращающейся в антициклоническом направлении в окружении мелкомасштабных вихрей, отделившихся на переходном этапе. После отделения вихревых нитей и мелких вихрей оставшееся ядро принимает компактную форму с отношением “полуосей”, не превышающим 3, и, таким образом, является устойчивым [14].

На обоих этих рисунках конфигурации вихревых пятен изображены в указанные моменты безразмерного времени и масштабирование проведено при условии, что скорость жидких частиц на первоначально круговой контуре составляет 30 см/с [6] и одной единице безразмерного времени отвечает примерно 10 сут в первом случае и 24 сут во втором.

По результатам численных экспериментов в рамках модели трехслойного океана с близкими к

реальным для Атлантики распределением плотности по глубине и наблюдаемыми размерами линз установлена закономерность взаимодействия вихревых пятен среднего слоя в зависимости от числа Фруда. Определен критерий критических расстояний между линзами, когда происходит их слияние. Этот результат позволяет объяснить наблюдаемый факт существования долгоживущих линз (до 10 лет) на больших расстояниях (более 7000 км) от источника их формирования (Кадисского залива).

Работа поддержана РФФИ (проекты 08–05–00061-а, 10–05–00144-а, 10–05–00432-а, 10–05–00646-а), РФФИ/CRDF (проект 09–01–92504-ИК\_a/RUM1–2943–RO–09), Министерством образования РФ (Аналитическая ведомственная целевая программа “Развитие научного потенциала высшей школы”, проект 2.1.1/554).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филошкин Б.Н., Алейник Д.Л., Демидов А.Н. и др. В сб.: Водные массы океанов и морей. М.: Макс Пресс, 2007. С. 92–129.
2. Filyushkin B.N., Aleynik D.L., Kozhelupova N.G., Gruzinov V.M. Selected papers of the Intern. Conf. “Fluxes and Structures in Fluids: Physics of Geospheres”, June 24–27, 2009. М., 2010. P. 123–127.
3. Филошкин Б.Н., Алейник Д.Л., Грузинов В.М., Кожелупова Н.Г. Исследование океанов и морей // Тр. Гос. океаногр. ин-та. 2002. В. 208.
4. Armi L., Zenk W. // J. Phys. Oceanogr. 1984. V. 14. № 10. P. 1560–1576.
5. Richardson P.L., Walsh D., Armi L. et al. // J. Phys. Oceanogr. 1989. V. 19. № 3. P. 371–383.
6. Егорихин В.Д., Иванов Ю.А., Корт В.Г. и др. // Океанология. 1987. Т. 37. № 2. С. 165–175.
7. McDowell S.E., Rossby H.T. // Science. 1978. V. 202. № 4372. P. 1085–1086.
8. Каменкович В.М., Кошляков М.Н., Монин А.С. Синоптические вихри в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 512 с.
9. Соколовский М.А. // Изв. АН СССР. ФАО. 1991. Т. 27. № 5. С. 550–562.
10. Макаров В.Г. // Моделирование в механике. 1991. Т. 5(22). № 4. С. 83–95.
11. Ламб Г. Гидродинамика. М.; Л.: Гостехиздат, 1947. 927 с.
12. Hopfinger E.J., van Heijst G.J.F. // Ann. Rev. Fluid Mech. 1993. V. 25. P. 241–289.
13. Schultz-Tokos K.L., Hinrichsen H.-H., Zenk W. // J. Phys. Oceanogr. 1994. V. 24. № 10. P. 2129–2141.
14. Love A.E.H. // Proc. London. Math. Soc. 1893. V. s1–25. P. 18–43.