

УДК 551.465.42

ЭВОЛЮЦИЯ ВНУТРИТЕРМОКЛИННЫХ ВИХРЕЙ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ НАД ПОДВОДНОЙ ВОЗВЫШЕННОСТЬЮ

© 2011 г. Б. Н. Филюшкин, М. А. Соколовский, Н. Г. Кожелупова, И. М. Вагина

Представлено академиком Р.И. Нигматулиным 15.06.2011 г.

Поступило 21.06.2011 г.

На континентальных склонах Пиренейского полуострова формируются антициклонические и циклонические внутритермоклинные вихри. Они возникают в результате динамической неустойчивости придонного потока средиземноморских вод (СМВ). Струя СМВ движется вдоль южного и западного склонов и при пересечении каньонов и возвышенностей дна происходит как слив вод по каньонам [1], так и отрыв струй в сторону открытого моря [2]. Такие вихри выделяются высокими значениями температуры и солёности по отношению к окружающим водам и образуют особый класс средиземноморских вихрей (линз или медди). Это дает возможность определять их положение в океане и геометрические размеры жидких объемов с повышенным содержанием тепла и соли, а также исследовать их эволюцию на всех стадиях жизни вплоть до разрушения. Все эти вихри, как правило, оказываются локализованными в слое 500–1500 м. При их моделировании удобно представлять линзы в виде вихревых пятен в трехслойной модели с постоянными значениями плотности и следующими толщинами: верхний слой 0–500 м, средний 500–1500 м и придонный 1500–5000 м [3, 4].

Обычно в начальный момент отрыва объема вод от струи СМВ формируется дипольная система из двух вихрей. Время жизни циклонических вихрей составляет не более 0.5–1 года, тогда как антициклонические вихри (последние называют также медди [3]) в среднем живут 4–5 лет, но в отдельных случаях отмечаются медди 7–8-летнего возраста. Тем не менее в районе формирования, прилегающем к Пиренейскому полуострову, существует область океана, где встречаются вихри противоположных знаков вращения [5]. Именно в этом районе отмечается высокая концентрация

вихрей. Так, в рамках проекта AMUSE за период с мая 1993 г. по февраль 1994 г. было обнаружено и отслежено около 19 линз [6]. Поэтому при исследовании эволюции медди в этой области необходимо учитывать их взаимодействия как между собой, так и с вихрями циклонического вращения. Те и другие при этом подвержены влиянию донного рельефа. В экспериментах SEMANE 99 и 2000 на юге Кадисского залива были обнаружены идентичные ситуации: два близко расположенных медди разных размеров взаимодействуют между собой и с циклоническим вихрем меньшего размера, также заполненным теплыми и солеными водами Средиземного моря [5, 7]. При этом медди имели выраженное двухъядерное строение по вертикальному распределению температуры и солёности. Максимальные значения характеристик отмечались на глубинах 270–800 и 1100–1300 м. В эксперименте 2000 г. [7] траектории поплавков показали, что все они собрались в более сильном вихре, что подтверждает их быстрое и интенсивное взаимодействие. Это не позволило проследить стадии взаимодействия двух медди. Имеющиеся спутниковые карты возвышения уровня иногда позволяют выделять медди на поверхности океана (см. [4]), но в рассматриваемом случае не удалось выявить характер взаимодействия и перемещения вихрей во времени и пространстве, совпадающий с результатами, полученными по данным гидрологических наблюдений [5, 7].

На расстояниях, больших 200–400 км, как правило, встречаются только антициклонические вихри, которые мигрируют со скоростью $1\text{--}3\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ на расстояния до 6000 км. В основном медди разрушаются на расстояниях 2000–2500 км от очага их формирования. Имеющиеся экспериментальные наблюдения показывают, что в отдельных районах Атлантического океана медди, встречаясь с подводными горами, частично или полностью разрушаются. В работе [8] приведены результаты двух гидрологических съемок (1–3 и 9–12 февраля 1989 г.) крупной линзы (диаметром около 100 км и объемом около 4600 км^3) при ее приближении с северо-востока к подводным горам Крузер и Эр-

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

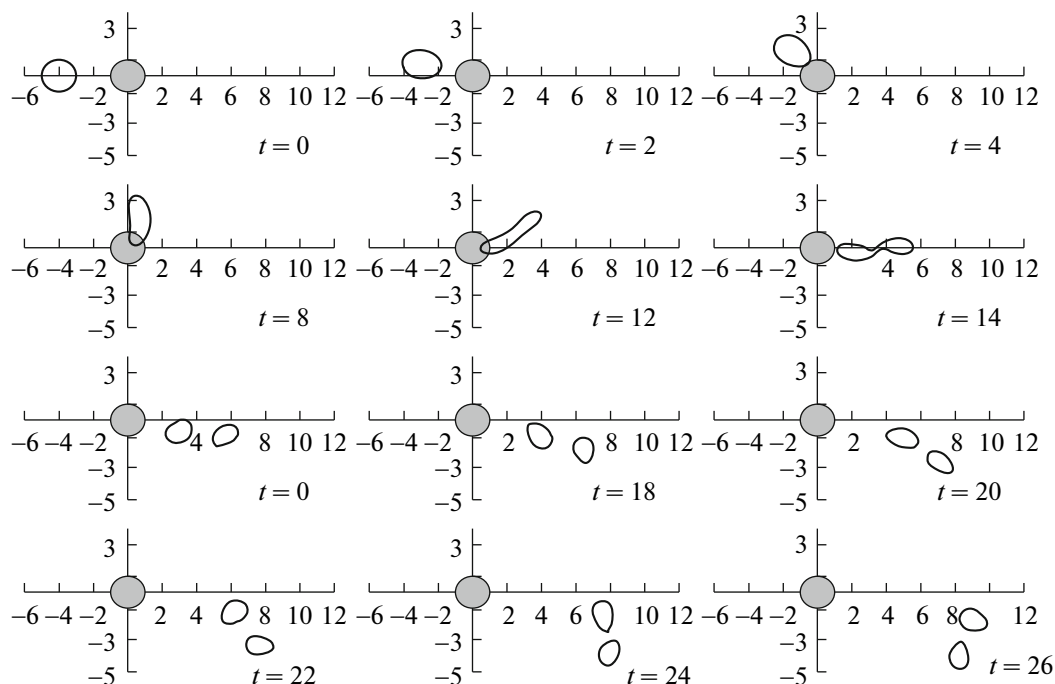


Рис. 1. Конфигурации контуров антициклонической линзы, набегающей на подводное препятствие при $U = 2$ см/с, $h = 1000$ м в указанные моменты безразмерного времени. Радиусы исходной линзы и модельной круговой возвышенности (всюду закрашена) равны 50 км.

винг. За время между съемками она прошла 12 миль, потеряла в объеме 100 км^3 и приблизилась к подводному проливу между о. Эрвинг и о. Иер. В январе 1990 г. к западу от этого пролива была обнаружена линза в виде устойчивого гидродинамического образования объемом около 600 км^3 . Можно предположить, что это фрагмент вышеупомянутой большой линзы [9]. Примеры встреч линз с подводными горами по данным гидрологических съемок приведены в работе [10], а по данным траекторий глубоководных поплавков — в работах [6, 11].

Однако по натурным данным практически невозможно проследить характер эволюции линзы при прохождении над подводным препятствием [12]. Спутниковые наблюдения за проявлениями внутритермоклинных линз на поверхности океана все еще ограничены по точности и не позволя-

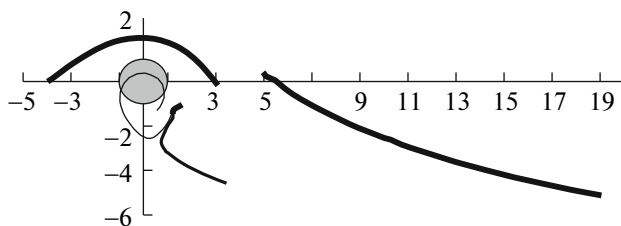


Рис. 2. Траектории центров вихрей при $U = 2$ см/с, $h_1 = 1185.12$ м и $h_2 = 1185.11$ м.

ют говорить определенно о характере взаимодействия вихрей как между собой, так и с подводными возвышенностями. Проблема дистанционных наблюдений усложняется и тем, например, что поплавки, помещенные в тело одной линзы, при ее взаимодействии с другой могут совершать сложные хаотические движения [4, 7].

В работе рассматриваются результаты моделирования воздействия подводных возвышенностей различной высоты на движение циклонических и антициклонических внутритермоклинных вихрей с помощью метода контурной динамики.

Исследуется набегание первоначально круговой антициклонической линзы, переносимой баротропным восточным потоком со скоростью U (рис. 1–3) на осесимметричное подводное возвышение (аналог одиночной подводной горы) при значениях высоты горы над дном в пределах от 800 до 1400 м, т. е. когда ее вершина не выходит за пределы придонного слоя. Оказалось, что характер эволюции линз очень чувствителен к изменению высоты возвышенности. Так, при $h = 800$ м первоначально круговая антициклоническая линза обходит возвышенность вдоль ее северной периферии, принимает квазиэллиптическую форму и, вращаясь вокруг своей оси, сносится в юго-восточном направлении. При $h = 1000$ м эволюция линзы принимает качественно другой характер (рис. 1): обходя возвышенность с севера, она существенно вытягивается. Образуются два ядра

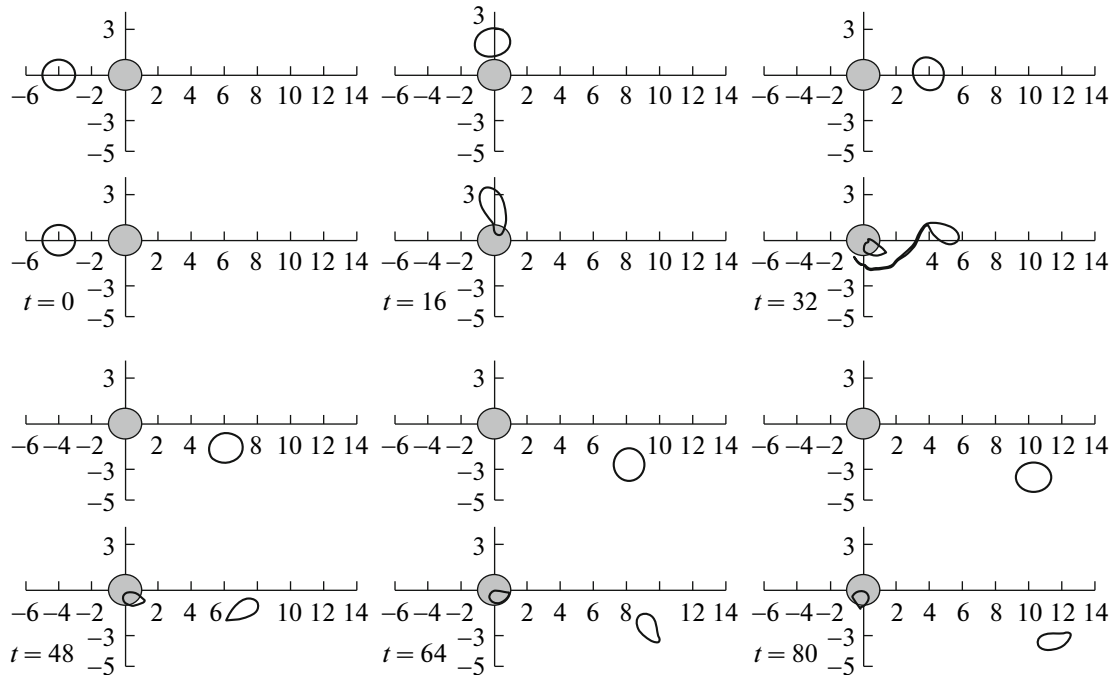


Рис. 3. Синхронные конфигурации контуров циклонической (сверху) и антициклонической (снизу) линз, набегающих на подводное препятствие при $U = 2$ см/с, $h = 1400$ м.

с перемычкой, которая затем рвется, и формируются две практически равновеликие линзы. Далее они также сносятся, вращаясь вокруг общего центра. При $h = 1200$ м линза делится на две неравные части, но лишь одна из них уносится потоком, а вторая захватывается подводной горой и остается в ее окрестности.

Бифуркационный характер поведения траекторий вихревых пятен антициклонических линз демонстрирует рис. 2, где представлены совмещенные траектории центров вихревых пятен при очень близких значениях высот: $h_1 = 1185.12$ м и $h_2 = 1185.11$ м. Здесь жирной линией отмечены совпадающие траектории, тонкой линией – траектория при $h = h_1$, полужирной – при $h = h_2$. Первому из этих случаев отвечает снос обоих вихрей, второму – захват одного из них.

Анализ поля изолиний функции тока горизонтального движения в среднем слое дает качественное объяснение такой бифуркации: области захвата отвечает внутренняя часть петли сепаратрисы, формирующейся над южной частью возвышенности.

Поскольку, как отмечалось выше, для области океана, прилегающей к Пиренейскому полуострову, характерно существование не только антициклонических, но и циклонических линз, то важно отметить различный характер взаимодействия вихрей противоположных знаков с одной и той же возвышенностью. На рис. 3 показаны синхронные конфигурации эволюционирующих

вихревых пятен для линз с циклонической (сверху) и антициклонической (снизу) потенциальными завихренностями при $h = 1400$ м. Если циклон обходит возвышенность по ее северной периферии, практически не меняя своей формы, и уносится потоком, то антициклон, обойдя гору, делится на две неравные части, одна из которых прочно захватывается топографией.

В реальном океане эволюция и разрушение линз создают дополнительные механизмы перемешивания вод в промежуточном слое. Поэтому в районах океана со сложной орографией дна при дрейфе линз в слое 500–1500 м может возникать набор линзообразных вихрей различных масштабов. Это приводит к сложной структуре распределения температуры и солености на гидрологических разрезах. Так, на ограниченном по размерам полигоне (100×110 км с центром $48^\circ 20'$ с.ш. и $21^\circ 10'$ з.д.) по материалам детальных съемок на нис “Академик Иоффе” в августе 1989 г. было обнаружено значительное число вихревых образований в слое 550–1300 м [13]. Разница температур между теплыми и холодными водами достигала 1.2°C , а по солености 0.2 psu. Там же был обнаружен сильно разрушенный струйными течениями антициклонический вихрь. В действительности это фрагмент материнского вихря, который состоит по вертикали из 5 линз с диаметрами от 10 до 20 км и толщинами от 50 до 150 м. В этих линзах отмечается абсолютный максимум температуры и солености на всех глубинах.

Кроме того, из модельных экспериментов следует, что над подводными возвышенностями могут задерживаться фрагменты антициклонических вихрей на довольно длительное время (рис. 2). В работе [12] описан случай обнаружения в апреле 1997 г самой северной медди “Ulla” над банкой Шарко (45° с.ш., 11°30' з.д.) с глубиной над вершиной около 3500 м. Это была эллиптическая линза, расположенная в слое 600–1600 м, с максимумами аномалий температуры и солёности на глубине 1200 м, равными соответственно 2.5°C и 0.5 psu. Азимутальная скорость вращения вихря достигала значения максимума 15–20 см · с⁻¹ на длине радиуса 15 км. Линза отслеживалась лагранжевыми поплавками в течение 18 месяцев, а постоянство ее характеристик подтверждали гидрологические зондирования. Медди “Ulla” вращалась по часовой стрелке строго над возвышенностью Шарко в течение 11 месяцев (аналогичное поведение линзы над круговым подводным препятствием мы наблюдаем на рис. 3, где характерное время расчета составляет примерно 1 год).

Показано, что материалы уникальных натуральных наблюдений удовлетворительно подтверждаются основными результатами наших модельных экспериментов. Подобные расчеты позволяют с помощью простой гидродинамической модели предсказывать основные сценарии не подающегося пока наблюдению взаимодействия внутри-термоклинных вихрей в условиях сложного донного рельефа. Полученные качественные результаты могут явиться также основой планирования последующих натуральных экспериментов.

Работа поддержана РФФИ (10–05–00144_а, 10–05–00432_а, 10–05–00646_а) РФФИ/CRDF

(проект 09–01–92504_ИК_а/RUM1–2943–RO–09), Министерством образования РФ (Аналитическая ведомственная целевая программа “Развитие научного потенциала высшей школы”, проект 2.1.1/554).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алейник Д.Л., Плахин Е.А., Филюшкин Б.Н.* // *Океанология*. 1998. Т. 38. № 5. С. 645–653.
2. *Филюшкин Б.Н., Плахин Е.Н.* // *Океанология*. 1996. Т. 35. № 6. С. 875–882.
3. *Филюшкин Б.Н., Соколовский М.А., Кожелупова Н.Г., Вагина И.М.* // *ДАН*. 2010. Т. 434. № 5. С. 688–691.
4. *Filyushkin B.N., Sokolovskiy M.A.* // *J. Mar. Res.* 2011. V. 69. № 2/3.
5. *Carton X., Chèrubin L., Paillet J., et al.* // *J. Mar. Syst.* 2002. V. 32. P. 13–42.
6. *Richardson P.L., Bower A.S., Zenk W.* // *Intern. WOCE Newslett.* 1999. № 34. P. 18–20.
7. *Carton X., Danialt N., Alves J., et al.* // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. C06017.
8. *Дыхно Л.А., Морозов Е.Г., Никитин С.В. и др.* // *Океанология*. 1991. Т. 31. № 1. С. 55–61.
9. *Шапиро Г.И., Мещанов С.Л., Емельянов М.В.* // *Океанология*. 1992. Т. 32. № 3. С. 420–427.
10. *Журбас В.М., Лозовацкий И.Д., Озмидов Р.В.* // *ДАН*. 1991. Т. 318. № 5. С. 1224–1229.
11. *Richardson P.L., Tychensky A.* // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № C11. P. 25029–25045.
12. *Paillet J., LeCann B., Serpette A., et al.* // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26. P. 1877–1880.
13. *Филюшкин Б.Н., Алейник Д.Л., Грузинов В.М., Кожелупова Н.Г.* // *ДАН*. 2002. Т. 387. № 4. С. 545–548.