

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВИХРЕВЫХ ПЯТЕН И ПЯТЕН ПАССИВНОЙ ПРИМЕСИ В ОКРЕСТНОСТИ ИЗОЛИРОВАННОЙ ПОДВОДНОЙ ГОРЫ В РАМКАХ ТРЕХСЛОЙНОЙ МОДЕЛИ ОКЕАНА

М. В. Шатохин¹, В. М. Егорова¹, М. А. Соколовский^{1,2}

¹ *Институт водных проблем РАН,
Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3;*

² *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: shatokhin_m9@mail.ru; vikchik96@yandex.ru; sokolovskiy@iwp.ru*

В рамках трехслойной квазигеострофической модели в приближении f -плоскости с помощью метода контурной динамики проведено исследование воздействия топографического антициклона, сформированного над изолированной подводной горой, на движение поверхностного, подповерхностного или придонного вихревого пятна, либо пятна пассивной примеси, переносимого зональным вертикально однородным течением. В частности, показана возможность частичного захвата вихревого пятна квазистационарным топографическим вихрем.

Ключевые слова: трехслойная модель океана, топографический вихрь, пассивная примесь, вихревое взаимодействие, вентиляция вихря, метод контурной динамики

Введение

Исследование распространения загрязнений в морской среде является актуальной задачей. Различные механизмы распространения загрязняющих веществ рассмотрены, например, в работах (Озмидов, 1986; Alomar et al., 2016; Liubartseva et al., 2018). Тем не менее, вопрос горизонтального переноса загрязняющих примесей течением в окрестности изолированной подводной горы остается недостаточно изученным.

В настоящей работе, являющейся продолжением работ (Шатохин, Соколовский, 2023; Шатохин, Егорова, 2024), исследуются некоторые особенности захватывающих свойств изолированной подводной горы по отношению к поверхностным, подповерхностным или придонным вихревым пятнам, либо пятнам пассивной примеси, перемещающимся в вертикально однородном зональном потоке U . Отметим, что под вихревым пятном мы понимаем замкнутую жидкую область с постоянным значением потенциальной завихренности, а под пятном пассивной примеси – замкнутую жидкую область без завихренности (с нулевой потенциальной завихренностью). Поверхностными, подповерхностными или придонными мы называем пятна, принадлежащие, соответственно, верхнему, среднему или нижнему слоям модельного трехслойного океана.

Наличие неоднородностей рельефа морского дна приводит к формированию захваченных топографических вихрей (Козлов, 1984; Зырянов, 1995; Монин и др., 1990; Zyryanov, 2006; Sokolovskiy, Verron, 2014; Egorova et al., 2022; 2024; Егорова, 2024). В приближении однородного океана топографические вихри имеют форму вертикальных цилиндров (столбов Тейлора) (Taylor, 1921; 1923; Hide, 1961), в стратифицированном океане они имеют тенденцию к сужению снизу вверх (Davies, 1971; 1972; Hogg, 1973), представляя собой так называемые усеченные конусы Тейлора-Хогга (Козлов, 1984; Зырянов, 1995).

В процессе взаимодействия топографического вихря с вихревыми пятнами первоначально незавихренная жидкость может смешиваться с жидкостью внутри топографического вихря, захватываться, вымываться из него и переноситься по потоку. Этот эффект мы называем *вихревой вентиляцией* (Рыжов, Кошель, 2011).

В рамках модели трехслойного океана в работе исследуются процессы обмена массой между топографическим вихрем и внешним баротропным потоком, переносящим свободные вихревые пятна и пятна примеси.

1. Модель

Антициклонический топографический вихрь, генерируемый изолированной подводной горой, взаимодействует в трех слоях с вихревыми пятнами и/или пятнами примеси, набегающими на гору с вертикально однородным зональным потоком U восточного направления. Динамика вихревого пятна описывается эволюцией его контура в рамках модели контурной динамики (МКД), теоретические основы которого изложены в (Zabusky et al., 1979; Козлов, 1983; Dritschel, 1990; Pullin, 1992).

В данной работе используется МКД-модель трехслойного океана в приближении f -плоскости (Соколовский, 1991), где каждый слой характеризуется постоянным значением плотности воды ρ_j ($j = 1, 2, 3$) для верхнего, среднего и нижнего слоев соответственно, причем ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$); $H = h * (h_1 + h_2 + h_3)$ – общая глубина океана (h – масштаб глубины океана, h_j – безразмерная глубина j -го слоя, и, таким образом, $h_1 + h_2 + h_3 = 1$).

Выражения для функций тока в каждом слое с номером $j = 1, 2, 3$ записываются в виде:

$$\Psi_j(x, y, t) = \Psi_{0j}(x, y) + \sum_{i=1}^{k_j} \Pi_{ji} \oint_{C_{ji}(t)} M w d v_{ji} +$$

$$+ q_{j2} \sum_{l=1}^3 s_{2l} \sum_{i=1}^{k_l} \Pi_{ji} \oint_{C_{ji}(t)} M_1 w d v_{ji} + q_{j3} \sum_{l=1}^3 s_{3l} \sum_{i=1}^{k_l} \Pi_{ji} \oint_{C_{ji}(t)} M_1 w d v_{ji},$$
(1)

где $\Pi_j = \sum_{i=1}^{k_j} \Pi_{ji}$ – потенциальная завихренность в j -м слое, представленная кусочно-постоянным распределением с постоянными значениями Π_{ji} на конечных носителях S_{ji} , $k_j \geq 1$ – число вихревых пятен в j -м слое; $M = (r^2/4\pi)(\ln r - 1/2)$, $M_{1,2} = (\gamma_{1,2}/2\pi)[\gamma_{1,2} r K_1(\gamma_{1,2} r) - 1]$, $r = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2}$, (x, y) – координаты точки

наблюдения, (x_1, y_1) – координаты точки интегрирования, $C_{ji}(t)$ – эволюционирующие контуры вихревых пятен $S_{ji}(t)$, описываемые параметром v_{ji} , непрерывно меняющимся вдоль них в направлении против часовой стрелки; $w = [(x_1 - x)x_1 - (y_1 - y)y_1]/r^2$, точкой сверху обозначается частное дифференцирование по параметру v_{ji} ; K_1 – модифицированная функция Бесселя второго рода (функция Макдональда) первого

$$\text{порядка, } \gamma_{1,2} = \left(\sqrt{\frac{1}{2} \left[\frac{F_1}{h_1} + \frac{F_1+F_2}{h_2} + \frac{F_2}{h_3} \mp \sqrt{\left(\frac{F_1}{h_1} + \frac{F_1+F_2}{h_2} + \frac{F_2}{h_3} \right)^2 - 4 \frac{F_1 F_2}{h_1 h_2 h_3}} \right]} \right)^{-1}, \quad F_n = \frac{\rho_0 (fL)^2}{(g\Delta\rho_n H)}$$

аналоги чисел Фруда, связанные со скачками плотности на внутренних границах раздела между слоями $\Delta\rho_n = \rho_{(n+1)} - \rho_n$, $n = 1, 2$; ρ_0 – среднее значение плотности жидкости, f – параметр Кориолиса, L – характерный горизонтальный линейный масштаб, $g = 9.8 \text{ м/с}^2$; q_{mn} , s_{mn} – элементы матриц Q и S (3×3), их выражения представлены в работах (Соколовский, 1991; Sokolovskiy, 1997; Filyushkin et al., 2010; Sokolovskiy, Veron, 2014; Шатохин, Соколовский, 2023).

Первый член Ψ_{0j} в уравнении (1) характеризует «внешнее» (фоновое) поле течения, определяемое стационарным восточным потоком со скоростью U и возмущением рельефа дна океана, в качестве которого выбран гайот Затонского, принадлежащий массиву Магеллановых гор (центральная часть Восточно-Марианской котловины в области между 10° с. ш. и 22° с. ш. и 149° в. д. и 160° в. д. в Тихом океане). Подробное геоморфологическое описание гайота дано в (Мельников и др., 2013). Отметим, что уравнения (1) можно трактовать как теоретическую основу МКД: действительно, функции тока во всех слоях в любой точке (x, y) в момент времени t при фиксированных константах Π_{ji} и заданных функциях M, M_1, M_2 полностью определяются только мгновенными конфигурациями неизвестных контуров $C_{ji}(t)$.

Для каждого контура C_{ji} вихревого пятна площадью S_{ji} выбирается набор из N_{ji} опорных точек (маркеров). Для каждого маркера записываются уравнения движения:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} r_l^{ji} &= V_l^{ji}, \\ r_l^{ji} \Big|_{t=0} &= r_{l0}^{ji}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $l = 1, \dots, N_{ji}$; $j = 1, 2, 3$ – номер слоя; $i = 1, \dots, k_i$ – номер вихревого пятна; r_l^{ji} – радиус-вектор l -ой лагранжевой жидкой частицы контура C_{ji} , ограничивающего расположенное в j -ом слое вихревое пятно с номером i . Скорости V_l^{ji} в правой части (2) определяются из (1) с помощью стандартных геострофических соотношений, выполняющихся в каждом из слоев и связывающих горизонтальные скорости с функцией тока Ψ_j .

Численное интегрирование системы обыкновенных дифференциальных уравнений (2) производится с помощью метода Рунге-Кутты 4-го порядка с шагом $\Delta T = 0.5$ с учетом «оптимальных» формул Гилла (Хайрер и др., 1990). Количество узлов принимается из расчета 120 точек на окружность единичного радиуса. В процессе счета, в случае необходимости, это количество увеличивается/уменьшается пропорционально растущей/убывающей длине контура. В качестве основных элементов программы

используются программный комплекс В. Г. Макарова (Макаров, 1990) и разработанная им же процедура «контурной хирургии» (Макаров, 1991).

Функции, параметрически задающие контуры C_{ij} , интегрируются, дифференцируются и интерполируются с привлечением техники периодических кубических сплайнов (Альберг и др., 1972; Козлов, 1983).

Гайот мы аппроксимируем набором из семи круговых цилиндров, сужающихся снизу вверх, радиус нижнего цилиндра – 32 км, его высота – 680 м, для верхнего цилиндра – 19 км и 520 м соответственно. Начало декартовой системы координат (0; 0) помещаем в центр гайота (общий центр всех цилиндров), и весь гайот полностью принадлежит нижнему слою (см. подпись к рисунку 1). Оси x и y направлены на восток и север соответственно. С учетом принятых предположений выражения для Ψ_{0j} записываются в виде:

$$\Psi_{0j}(x, y) = -U \sum_{k=1}^7 \sigma_k c_k^j,$$

$$c_k^j(\gamma_1, \gamma_2, r, R_k) =$$

$$= \begin{cases} \frac{r^2}{4} + \frac{q_{j2} s_{23}}{s_{13} \gamma_1^2} (1 - \gamma_1 K_1(\gamma_1 R_k) I_1(\gamma_1 r)) + \frac{q_{j3} s_{33}}{s_{13} \gamma_2^2} (1 - \gamma_2 K_1(\gamma_2 R_k) I_1(\gamma_2 r)), & r \leq R_k; \\ \frac{R_k^2 (1 + 2 \ln \frac{r}{R_k})}{4} - \frac{R_k q_{j2} s_{23}}{s_{13} \gamma_1} I_1(\gamma_1 R_k) K_0(\gamma_1 r) - \frac{R_k q_{j3} s_{33}}{s_{13} \gamma_2} I_1(\gamma_2 R_k) K_0(\gamma_2 r), & r > R_k, \end{cases} \quad (3)$$

где $j = 1, 2, 3$; $\sigma_k > 0$ – высота аппроксимирующего гору цилиндра с номером $k \in (1, 7)$, R_k – радиус k -го цилиндра; I_1 – модифицированная функция Бесселя первого рода первого порядка, K_0 – модифицированная функция Бесселя второго рода нулевого порядка.

Подробное описание трехслойной модели океана с указанием значений ρ_j для каждого слоя, а также вертикальный разрез (вертикальную ось) гайота, аппроксимированного набором из семи вертикальных круговых цилиндров, представлены в (Шатохин, Соколовский, 2023).

2. Условия существования топографического вихря

При определенных условиях система цилиндров генерирует антициклонический топографический вихрь в виде сужающегося кверху усеченного конуса Тейлора-Хогга (см. рисунок 1).

Под топографическим вихрем мы понимаем область, ограниченную петлей сепаратрисы фазового портрета. Существование топографического вихря в каждом слое определяется наличием двух неподвижных (стационарных) точек фазового портрета: эллиптической, которую можно трактовать как центр топографического вихря, и гиперболической точки самопересечения сепаратрисы. Условия возникновения

этих точек и их расположение определяются скоростью внешнего потока U , объемом подводного препятствия и стратификацией (в нашем случае определяемой числами Фруда $F_{1,2}$).

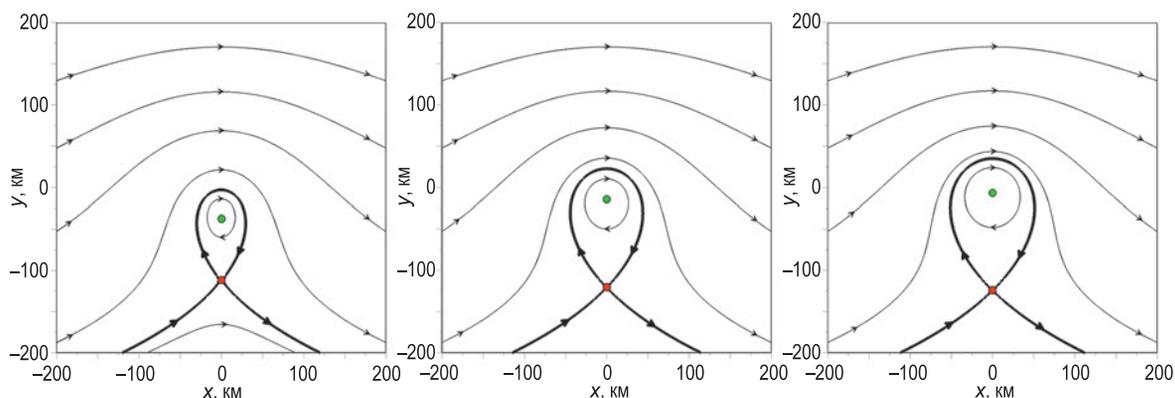


Рис. 1 – Примеры фазовых портретов (изолиний функций тока (3)) на плоскости безразмерных горизонтальных координат (x, y) для верхнего, среднего и нижнего слоев – слева направо – при $U = 0.5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $h_1^* = 400 \text{ м}$, $h_2^* = 600 \text{ м}$, $h_3^* = 4273 \text{ м}$; $\Delta\rho_1 = 0.00152 \text{ г/см}^3$, $\Delta\rho_2 = 0.00062 \text{ г/см}^3$ ($F_1 = 0.32$, $F_2 = 0.81$) и следующих радиусах и высотах семи цилиндров, аппроксимирующих форму гайота $(r_k^*, k_k^*) = (32\ 000 \text{ м}, 680 \text{ м})$; $(31\ 000 \text{ м}, 600 \text{ м})$; $(30\ 000 \text{ м}, 640 \text{ м})$; $(28\ 000 \text{ м}, 720 \text{ м})$; $(25\ 000 \text{ м}, 400 \text{ м})$; $(23\ 000 \text{ м}, 640 \text{ м})$; $(19\ 000 \text{ м}, 520 \text{ м})$ для $k = 1, 2, \dots, 7$ соответственно – от уровня невозмущенного дна к поверхности раздела нижнего и среднего слоев (общая высота возвышенности составляет 4200 м, и, таким образом, он полностью принадлежит нижнему слою). Жирные линии представляют собой сепаратрисы, особые изолинии функций тока, имеющие гиперболическую точку самопересечения и разделяющие фазовую плоскость на области с различными динамическими режимами. Стрелки на изолиниях функций тока указывают направление движения жидкости. Оранжевый и зеленый маркеры показывают положения гиперболических и эллиптических стационарных точек соответственно.

На рисунках 2–10 используются те же значения внешних параметров

На рисунке 2 показаны области существования топографических вихрей в зависимости от скорости внешнего потока U и размерных толщин верхнего h_1^* и среднего h_2^* слоев при условии, что $h_1^* + h_2^* = 1000 \text{ м}$ и типичной среднегодовой стратификации Тихого океана, рассчитанной по значениям условной плотности из таблицы 1.1 (Каменкович и др., 1987): для каждой пары толщин $h_{1,2}^*$ усредняются значения плотности вышележащих слоев, и, таким образом, получаются значения плотности слоев ρ_j ($j = 1, 2, 3$), которые затем пересчитываются в числа Фруда $F_{1,2}$.

Границы областей на рисунке 2, изображенные жирными линиями, строятся следующим образом: по формуле (3) находится значение скорости внешнего потока U , для которой при ее уменьшении впервые на фазовой плоскости появляется неподвижная (стационарная) точка (в виду осесимметричного характера величин c_k^j в (3) она может образоваться только на оси y , т. е. при $x = 0$); это значение скорости внешнего потока определяется как критическое для существования топографического вихря в слое (при этом гиперболическая и эллиптическая особенности совпадают, а петля

сепаратрисы вырождается в точку) при соответствующей стратификации и при меньших значениях U петля сепаратрисы имеет конечные размеры, и соответствующая точка плоскости $(U, h_1^*/h_2^*)$ уже принадлежит области топографического вихря этого слоя. В частности, рисунок 2 показывает, что при больших значениях U топографического захвата нет и все движения имеют «проносной» характер (в белой области).

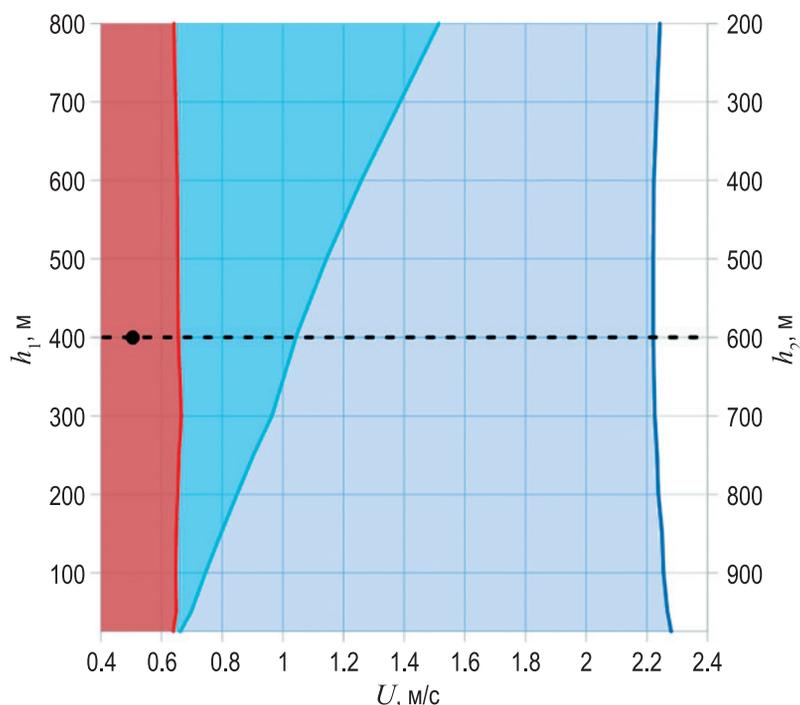


Рис. 2 – Области существования топографических вихрей в верхнем, среднем и нижнем слоях (красный, голубой и синий цвета соответственно) на плоскости переменных $(U, h_1^*/h_2^*)$ в предположении, что $h_1^* + h_2^* = 1000$ м

Параметры, принятые для моделирования: $U = 0.5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $h_1^* = 400 \text{ м}$, $h_2^* = 600 \text{ м}$, что соответствует черному маркеру в красной области на рисунке 2. При таких параметрах, как показывает рисунок 1, топографический вихрь существует во всех трех слоях (он, очевидно, имеет максимальную площадь в нижнем слое, где расположен гайот, и минимальную – в верхнем, где влияние гайота определяется лишь локальными деформациями поверхностей раздела между слоями, последовательно – нижней и верхней).

3. Динамика свободных вихревых пятен

3.1. Трехслойный вихрь (три вихревых пятна, по одному в каждом из слоев) в окрестности западного уса сепаратрисы

На рисунке 3 представлены результаты численного эксперимента по динамике первоначально кругового свободного вихревого пятна верхнего слоя. В действительности вихрь имеет трехслойную структуру: в верхнем слое пятно обладает

антициклонической потенциальной завихренностью $\Pi_{11} = -0.2$, а в среднем и нижнем слоях: $\Pi_{21} = \Pi_{31} = -0.001$, что соответствует практически пассивному трехслойному вихрю или вертикальному столбу примеси, охватывающему все три слоя. Координаты начальных положений центров трех пятен и их радиусы совпадают и равны $(x_0; y_0) = (-300 \text{ км}; -275 \text{ км})$, $R = 50 \text{ км}$ соответственно. Единице безразмерного времени T здесь и на следующих рисунках отвечает примерно 4.35 суток, и, таким образом, время соответствующего эксперимента составляет 30.45 суток, т. е. примерно месяц.

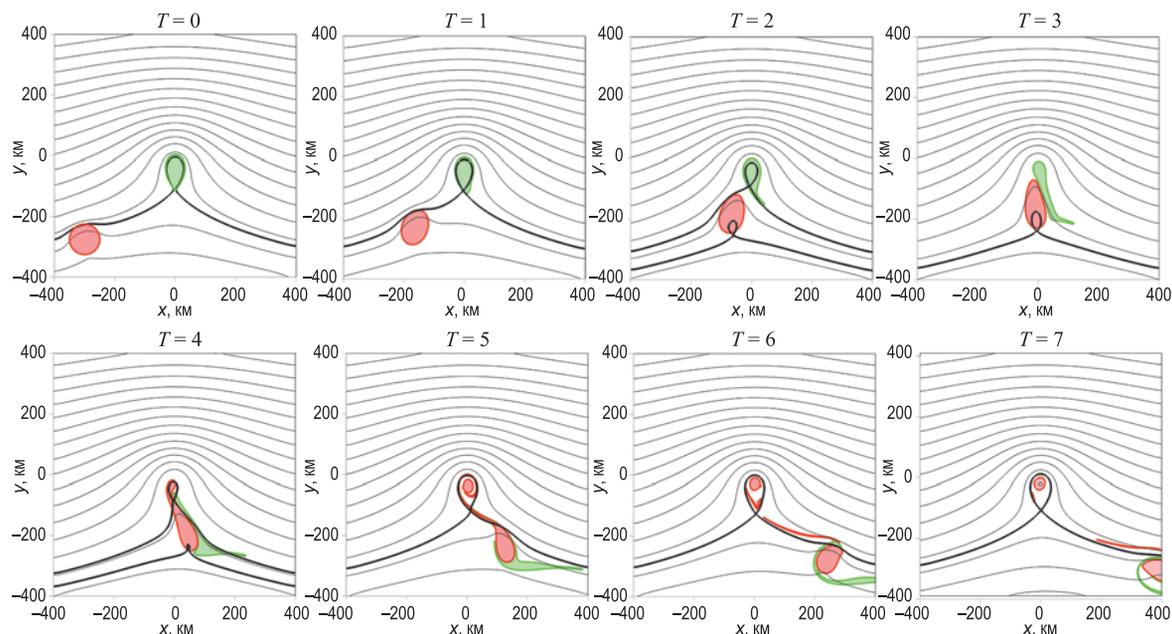


Рис. 3 – Эволюция поверхностного ($j = 1$), окрашенного красным цветом первоначально кругового вихревого пятна с антициклонической потенциальной завихренностью $\Pi_{11} = -0.2$ ($\Pi_{21} = \Pi_{31} = -0.001$ в среднем и нижнем слоях), переносимого зональным восточным потоком со скоростью $U = 0.5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ в окрестности гайота. Контуры эволюционирующего антициклонического вихревого пятна изображены яркой красной линией. Зеленым цветом закрашено пятно пассивной примеси, первоначально совпадающее с топографическим вихрем верхнего слоя

Антициклоническое вихревое пятно, очевидно, изменяет невозмущенную конфигурацию фазового портрета (представленную слева на рисунке 1) и, в частности, форму сепаратрисы, даже находясь вдали от гайота: при $T = 0$ антициклонический вихрь генерирует круговое поле, смещающее левую ветвь сепаратрисы к северу, кроме того, мы наблюдаем также локальное, направленное на север, куполообразное возмущение левого уса сепаратрисы, которое затем продвигается на восток вместе с переносимым течением вихревым пятном. По мере приближения поверхностного вихревого пятна к области над гайотом (центр которого расположен в начале координат) оно вытягивается в направлении петли сепаратрисы, которая, в свою очередь, со временем сужается ($T = 1-2$), вплоть до полного исчезновения ($T = 3$), поскольку антициклоническое вращение внутри вихревого пятна в окрестности северной его

периферии способствует локальному увеличению скорости восточного внешнего течения, что благоприятствует проявлению признаков «проносного» режима. При этом формируется вторая сепаратриса ($T = 2-4$), петля которой обусловлена теперь не топографией, а закруткой со стороны свободного вихря.

Важно отметить, что эта сепаратриса возникает лишь на временном интервале, когда свободный вихрь оказывается в окрестности гиперболической точки основной сепаратрисы, где внешнее восточное течение подвержено максимальному тормозящему воздействию застойной зоны, всегда возникающей в окрестности гиперболической особенности, что и обеспечивает нейтрализацию относительно слабого, направленного в южной части антициклона движения на запад, (т. е. оказываются выполненными условия появления стационарной точки).

Далее происходит разделение вихревого пятна. Его южная часть сносится вниз по потоку южнее горы и вовлекает в свое вращение зеленое пятно примеси, покинувшее окрестность возвышенности (происходит полная вентиляция топографического вихря) и вытянутое в виде нити. На временном интервале $T = 5-7$ южная часть вихревого пятна ведет себя как «вихрь-победитель» (Melander et al., 1987). В процессе восстановления сепаратрисы, обусловленной влиянием возвышенности и вновь возрождающейся по мере удаления и продвижения по потоку одной из частей свободного антициклона ($T = 4-7$), происходит топографический захват его второй части.

Вихревые пятна, расположенные в среднем и нижнем слоях (на рисунке не представлены), вытягиваясь вниз по течению и, делясь на две части, частично повторяют поведение пятен пассивной примеси, описанное в (Шатохин, Соколовский, 2023, рис. 9) для поверхностного и подповерхностного пятен. В топографических вихрях подповерхностного и придонного слоев наблюдаются процессы частичной вентиляции.

На рисунке 4, где также представлены результаты расчетов лишь для верхнего слоя, показан сценарий эволюции вихревого пятна, имеющего небольшую циклоническую потенциальную завихренность: $\Pi_{11} = 0.2$ и находящегося в сопровождении пренебрежимо слабых партнеров в среднем и нижнем слоях: $\Pi_{21} = \Pi_{31} = 0.001$.

В отличие от предыдущего случая с антициклоническим вихревым пятном, циклон, наоборот, воздействует на поток таким образом, что левая ветвь сепаратрисы в начальный момент времени отклоняется в южном направлении и приобретает локальный прогиб, направленный на юг, и, таким образом, вихревое пятно оказывается в той части потока, которая обтекает гору с севера. Приближаясь с запада к застойной зоне, вихрь ослабляет восточный поток, благодаря чему петля сепаратрисы над топографией временно увеличивается ($T = 3$), но затем вновь принимает свои средние размеры. Сам же циклон делится на две части так, что одна из них, вытягиваясь, огибает топографический вихрь вдоль его северной периферии, а вторая, большая, – вдоль южной. Обе части выпускают длинные вихревые нити, сносимые потоком вниз по течению вдоль восточной ветви сепаратрисы. Вслед за ними сносится и часть связанного с топографией зеленого пятна примеси, вытянутая в тонкую нить, воспроизводя, таким образом, слабую вентиляцию топографического вихря.

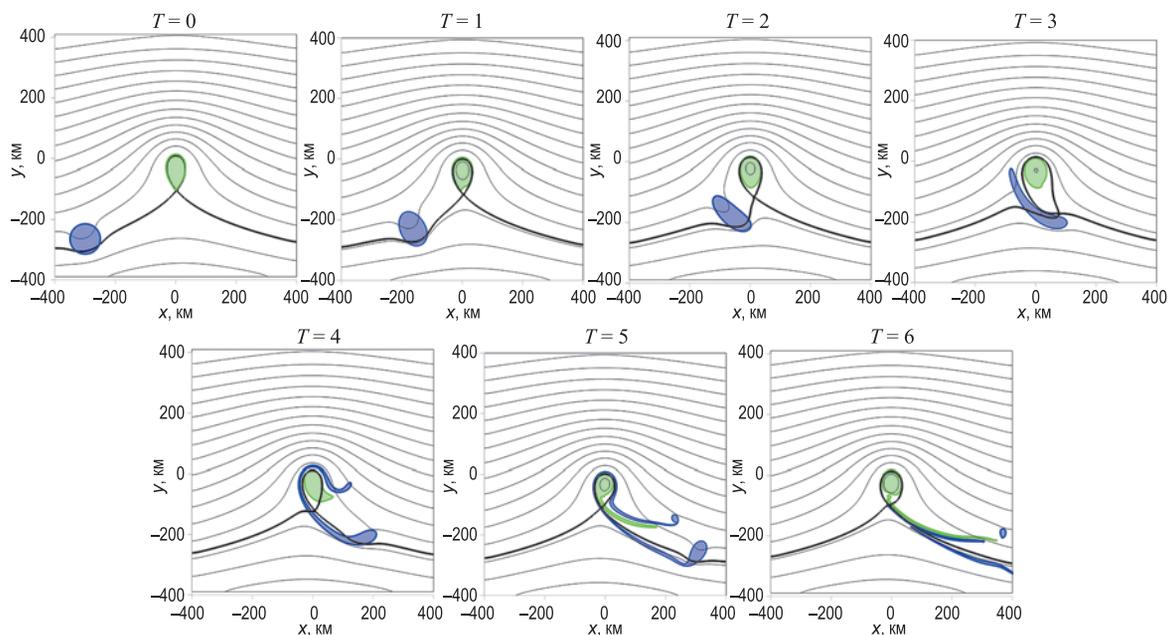


Рис. 4 – То же самое, что на рисунке 3, но для первоначально круговых вихревых пятен с потенциальными завихренностями: $\Pi_{11} = 0.2$ в верхнем слое и $\Pi_{21} = \Pi_{31} = 0.001$ в среднем и нижнем слоях соответственно. Яркие синие линии – контуры эволюционирующего циклонического вихревого пятна, внутренняя часть которого также закрашена синим цветом меньшей интенсивности

3.2. Два трехслойных вихря (шесть вихревых пятен, по два в каждом из слоев по обе стороны от западного уса сепаратрисы)

На рисунке 5 отображены результаты численных экспериментов по динамике двух первоначально круговых антициклонических вихревых пятен в верхнем, среднем и нижнем слоях – последовательно сверху вниз.

В верхнем слое пятна примеси имеют потенциальную завихренность: $\Pi_{11} = \Pi_{12} = -0.2$, в среднем и нижнем слоях – значительно меньшие значения: $\Pi_{21} = \Pi_{22} = -0.001$ и $\Pi_{31} = \Pi_{32} = -0.001$. Координаты начальных положений центров пятен $(x_{01}; y_{01}) = (-550 \text{ км}; -400 \text{ км})$ и $(x_{02}; y_{02}) = (-550 \text{ км}; -250 \text{ км})$ (в каждом слое первое пятно расположено южнее второго), радиусы всех первоначально круговых пятен равны между собой и составляют 50 км, что соответствует картине с пассивными пятнами в (Шатохин, Соколовский, 2023, рис. 10), где рассматривались только поверхностный и подповерхностный слои, а значения y_{01} и y_{02} выбирались из соображений симметрии относительно невозмущенного положения сепаратрисы.

Антициклонические вихревые пятна, взаимодействуя между собой, т. е. участвуя в совместном вращении относительно общего центра завихренности, инициируют локальный прогиб левого уса сепаратрисы, направленный горбом на север при $T = 0$, отчетливо наблюдающийся в верхнем слое (и более значительный, чем под воздействием одного антициклона на рисунке 3) и слабо различимый в среднем и нижнем слоях. Межвихревое взаимодействие в данном случае очень слабо и практически

полностью подавляется увлекающим воздействием внешнего восточного потока, однако, возможно, именно оно способствует более активному продвижению второго вихревого пятна по потоку и его последующему взаимодействию с топографией: это пятно «наматывается» на топографический вихрь, как на «вихрь-победитель», часть пятна захватывается топографическим вихрем, остальная его часть в виде вихревой нити сносится вниз по течению, унося попутно с собой значительный объем пассивной примеси, первоначально заполнявшей петлю сепаратрисы.

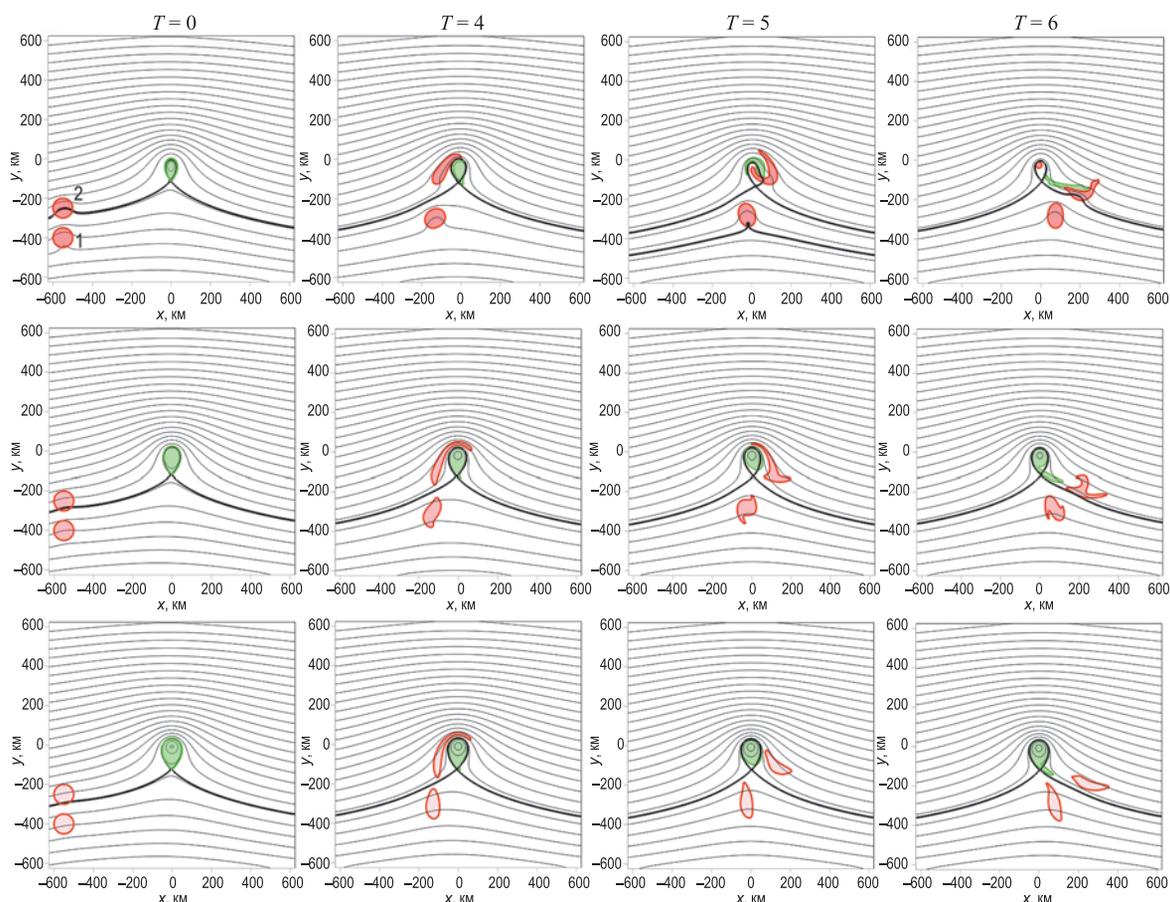


Рис. 5 – Эволюция двух трехслойных вихрей, переносимых зональным восточным потоком ($U = 0.5 \text{ м с}^{-1}$) в окрестности гайота в верхнем, среднем и нижнем слоях, последовательно сверху вниз (красные области с уменьшающейся интенсивностью закрашки от поверхности вниз при отрицательных значениях завихренности: $\Pi_{11} = \Pi_{12} = -0.2$, $\Pi_{21} = \Pi_{22} = \Pi_{31} = \Pi_{32} = -0.001$). Окрашенные зеленым цветом области имеют тот же смысл, что на рисунках 3 и 4, но для топографических вихрей в каждом слое

Первое вихревое пятно движется с потоком в восточном направлении, остаётся южнее возвышенности и сохраняя близкую к круговой форму. Кратковременное формирование дополнительной сепаратрисы ($T = 5$) имеет такое же объяснение, как в случае одного антициклонического вихря (рисунок 3).

Пятна примеси в подповерхностном и придонном слоях частично повторяют картины поведения поверхностных вихревых пятен. Вентиляция топографического вихря здесь проявляется очень слабо.

На рисунке 6 отображена динамика двух первоначально круговых пятен с циклоническими завихренностями: $\Pi_{11} = \Pi_{12} = 0.2$ в верхнем слое, и значительно более слабыми ($\Pi_{21} = \Pi_{22} = 0.001$) в среднем и ($\Pi_{31} = \Pi_{32} = 0.001$) в нижнем слоях – последовательно сверху вниз.

Заметим, что межвихревое взаимодействие, т. е. вращение циклонических вихревых пятен в направлении против часовой стрелки относительно середины отрезка, соединяющего их центры, здесь, как и в предыдущем эксперименте, полностью подавляется влекущим действием внешнего течения. Второе поверхностное вихревое пятно, набегая с фоновым потоком на северную периферию антициклонического топографического вихря, локально усиливает поток в ее окрестности и первоначально сужает петлю сепаратрисы (верхний ряд, $T = 4-5$), а затем вновь ее восстанавливает ($T = 5$). Это сопровождается существенной вентиляцией поверхностного топографического вихря. Само вихревое пятно, огибая топографический вихрь с севера, существенно вытягивается и сносится внешним потоком.

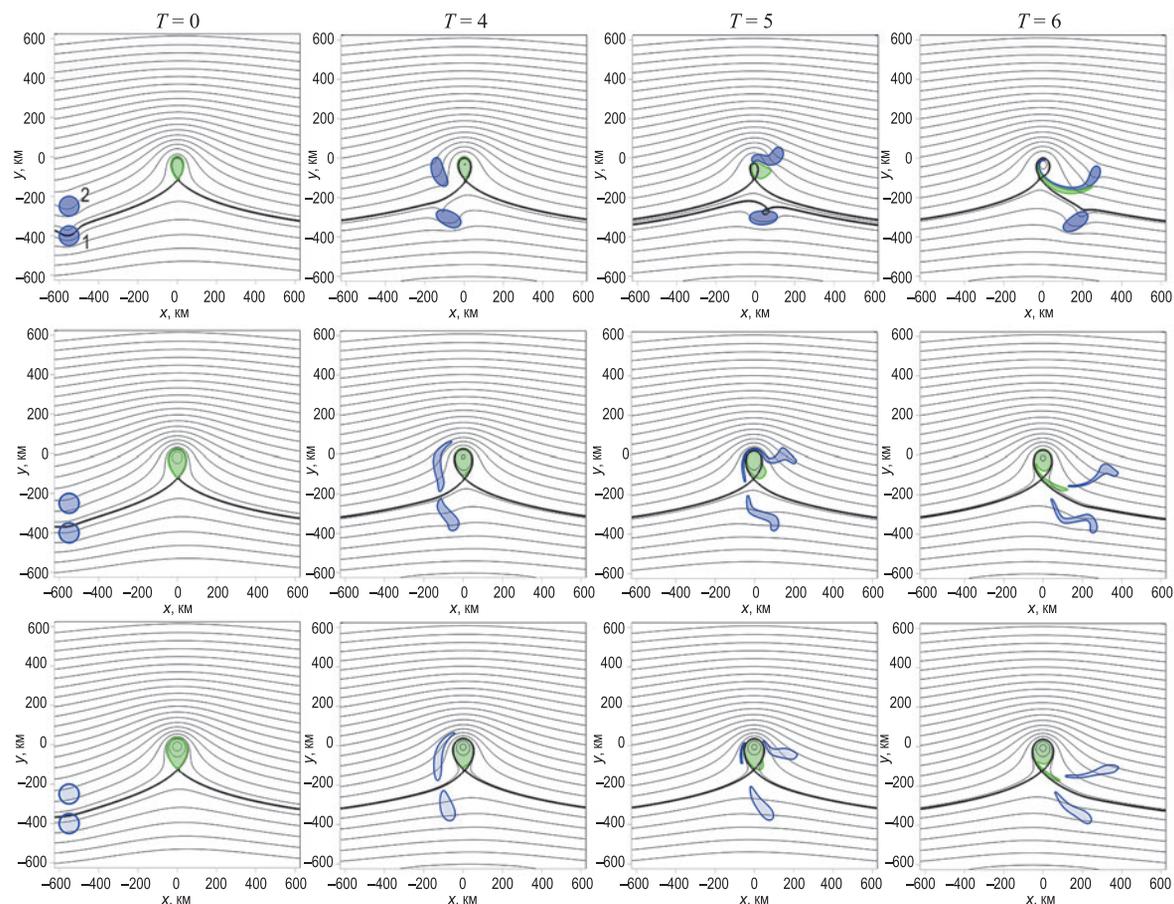


Рис. 6 – То же, что на рисунке 5, но с положительными значениями завихренности обоих вихревых пятен в каждом из слоев: $\Pi_{11} = \Pi_{12} = 0.2$; $\Pi_{21} = \Pi_{22} = \Pi_{31} = \Pi_{32} = 0.001$

Первый вихрь проходит южнее топографического вихря и в окрестности гиперболической точки основной сепаратрисы формирует свою дополнительную сепаратрису. При $T = 5$ мы наблюдаем слияние обеих сепаратрис в одну с двумя петлями.

Вихревые пятна подповерхностного и придонного слоев (рисунок 6, средний и нижний ряды), качественно повторяют поведение компактных частей поверхностных вихревых пятен.

На рисунке 7 представлен численный эксперимент, где в верхнем слое первое вихревое пятно имеет циклоническую завихренность $\Pi_{11} = 0.2$, а второе – антициклоническую завихренность $\Pi_{12} = -0.2$. В среднем и нижнем слоях аналогично (но для очень малых значений завихренности) $\Pi_{21} = \Pi_{31} = 0.001$, $\Pi_{22} = \Pi_{32} = -0.001$. Начальные координаты и радиусы пятен здесь и ниже такие же, как на рисунке 5.

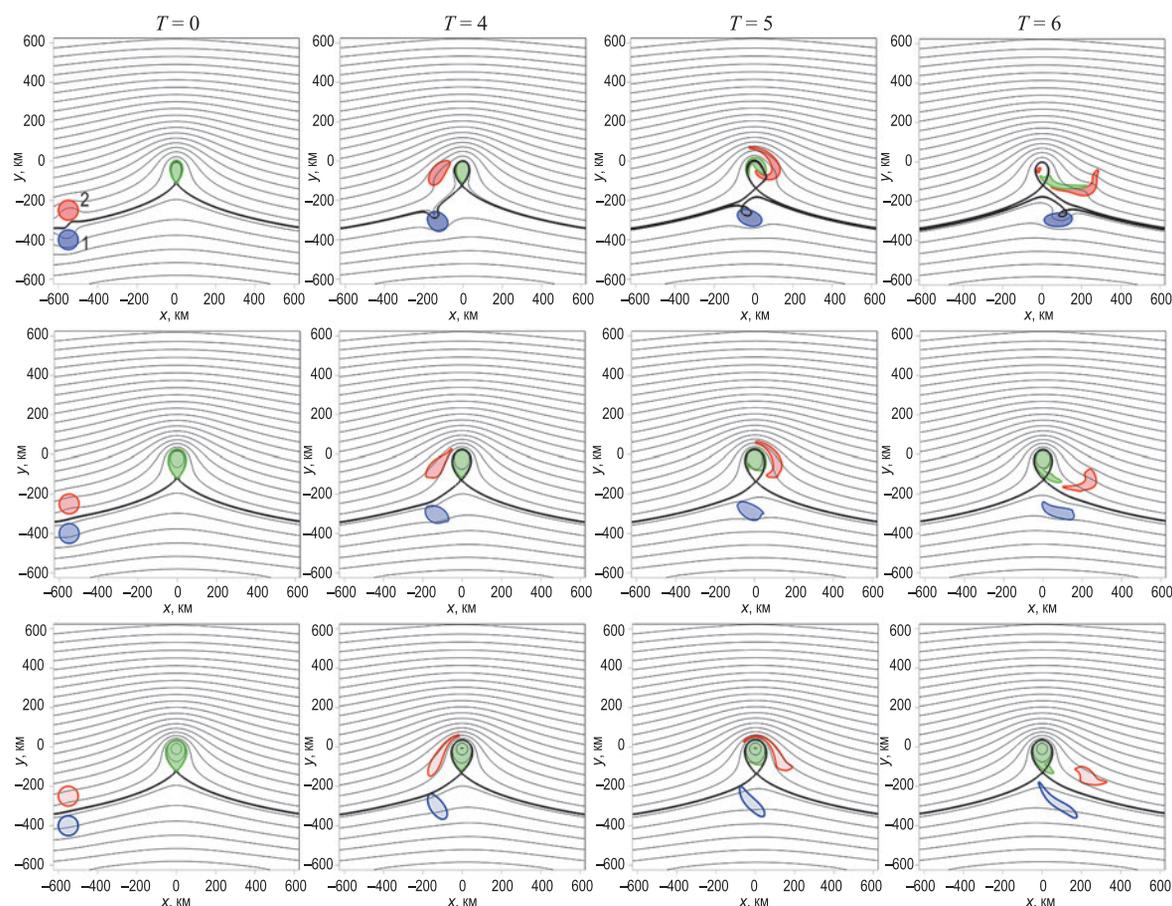


Рис. 7 – То же, что на рисунке 5, но при следующих значениях потенциальной завихренности: $\Pi_{11} = 0.2$, $\Pi_{12} = -0.2$; $\Pi_{21} = 0.001$, $\Pi_{22} = -0.001$; $\Pi_{31} = 0.001$, $\Pi_{32} = -0.001$

Несмотря на то, что самодвижение вихревых пар при таком их начальном расположении направлено на запад, их результирующее перемещение (при заданных значениях Π_{ji}) даже в поверхностном слое подвержено преобладающему воздействию внешнего восточного потока. Здесь поведение второго (антициклонического) поверхностного вихревого пятна отличается от рассмотренного в эксперименте с двумя антициклонами (рисунок 5), оно отесняется на север под влиянием первого (циклонического), несколько отставшего, вихревого пятна, и его взаимодействие с топографическим вихрем на интервале ($T = 4-6$) выражено слабее: захваченная часть антициклонического вихревого пятна занимает меньшую область внутри петли

сепаратрисы, чем на рисунке 5, и вентиляция топографического вихря к последнему расчетному моменту носит не полный характер. Поведение первого вихревого пятна напоминает то, что наблюдалось в эксперименте с двумя циклонами (рисунок 6, верхний ряд), однако при $T = 5$ условие слияния двух сепаратрис не выполняется (по-видимому, слияния не будет и в дальнейшем).

Подповерхностное и придонное вихревые пятна примеси следуют вдоль изолиний функций тока, слегка вытягиваясь вдоль них (сильнее – в нижнем слое). Вентиляция топографических вихрей в этих слоях выражена еще слабее, что очевидно.

В эксперименте на рисунке 8 представлена динамика двух трехслойных вихрей, для которых в верхнем слое первое вихревое пятно имеет антициклоническую завихренность $\Pi_{11} = -0.2$, а второе – циклоническую $\Pi_{12} = 0.2$. В среднем и нижнем слоях имеем $\Pi_{21} = -0.001$, $\Pi_{22} = 0.001$ и $\Pi_{31} = -0.001$, $\Pi_{32} = 0.001$ соответственно. При таком распределении завихренностей направление самодвижения вихревых пар в каждом из слоев совпадает с направлением внешнего потока (в противоположность с ситуацией на рисунке 7). Как и в предыдущем эксперименте, ввиду слабости вихревой пары, самодвижение играет очень слабую роль, результирующее движение практически полностью определяется скоростью внешнего течения.

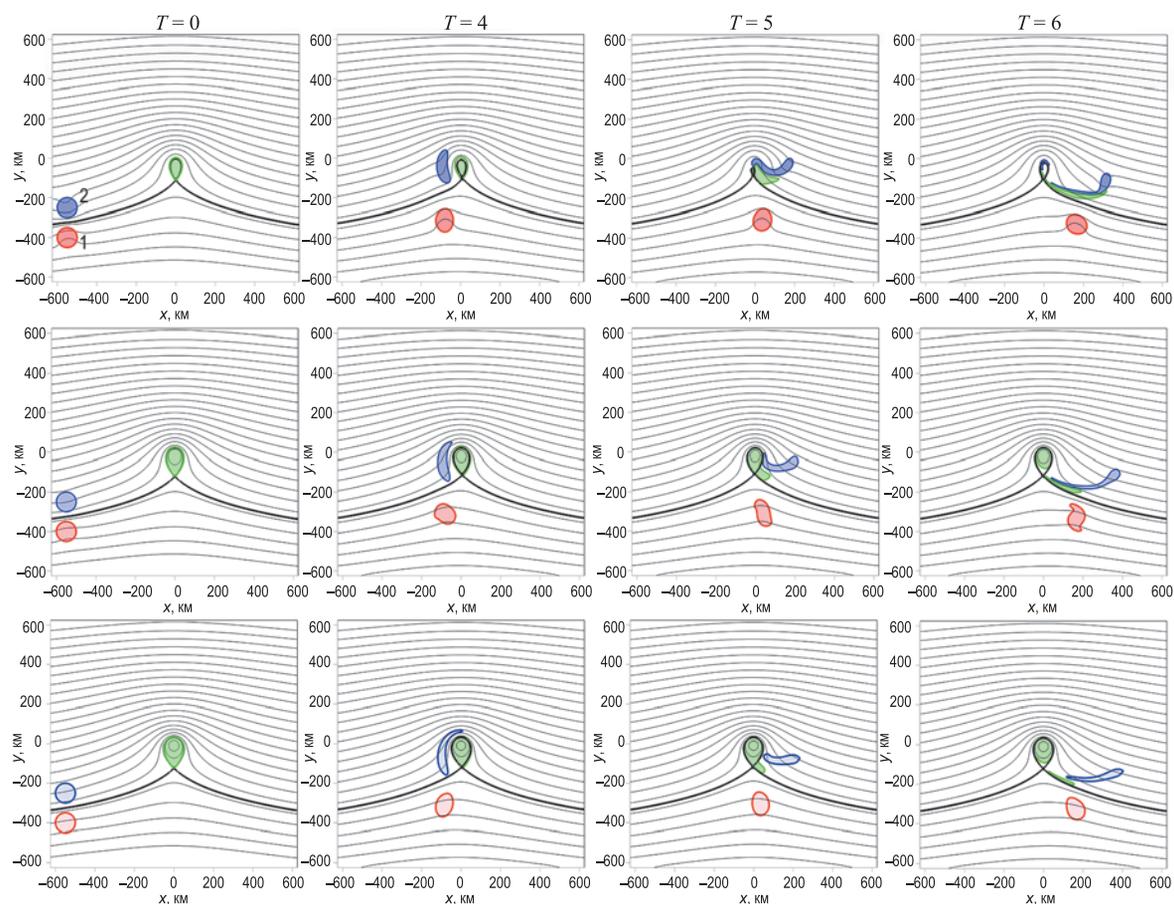


Рис. 8 – То же, что на рисунке 7, но с противоположными знаками завихренности всех вихревых пятен, т. е. $\Pi_{11} = -0.2$, $\Pi_{12} = 0.2$; $\Pi_{21} = -0.001$, $\Pi_{22} = 0.001$; $\Pi_{31} = -0.001$, $\Pi_{32} = 0.001$

Первое (антициклоническое) поверхностное вихревое пятно (рисунок 8, верхний ряд) сносится потоком в южной части области, практически не меняет своей формы, и его поведение мало отличается от поведения циклонического вихря в предыдущем эксперименте на рисунке 7, за исключением того, что он не генерирует формирование дополнительной сепаратрисы.

Второе (циклоническое) пятно переносится потоком (а также за счет слабого воздействия антициклонического партнера) южнее топографического вихря вниз по течению и во многом повторяет движение антициклона в предыдущем примере.

Подповерхностные и придонные вихревые пятна примеси (рисунок 8, средний и нижний ряды) следуют вдоль изолиний функций тока, незначительно вытягиваясь (несколько сильнее в нижнем слое). В среднем слое проявляется эффект ослабления топографического вихря, вследствие чего его вентиляция становится более выраженной (сравните с рисунком 7, средний ряд). Первое вихревое пятно обоих слоев при прохождении окрестности топографического вихря теряет свою округлую форму и затем все более и более вытягивается вдоль потока.

3.3. Два сильных трехслойных вихря

На рисунке 9 отображены результаты численных экспериментов по динамике (слева направо) двух первоначально круговых свободных вихрей в верхнем слое. Вихри верхнего слоя, аналогично случаю на рисунке 7, имеют противоположные знаки завихренности, но значения завихренности увеличены в 7 раз: $\Pi_{11} = 1.4$, $\Pi_{12} = -1.4$; в среднем и нижнем слоях вихревые пятна по-прежнему практически пассивны: $\Pi_{21} = 0.001$, $\Pi_{22} = -0.001$; $\Pi_{31} = 0.001$, $\Pi_{32} = -0.001$ (на рисунке не представлены). Координаты начального положения центров вихрей не изменены: $(x_{01}; y_{01}) = (-550 \text{ км}; -400 \text{ км})$ и $(x_{02}; y_{02}) = (-550 \text{ км}; -250 \text{ км})$, первоначальный радиус вихревых пятен составляет 50 км в каждом слое. Здесь, как и на рисунках 3 и 4, мы рассмотрим поведение вихрей только в верхнем слое.

Увеличение завихренности приводит к тому, что образуются две дополнительные сепаратрисы (синяя и красная жирные линии, отвечающие по цвету раскраске вихревых пятен). При этом западная ветвь сепаратрисы топографического вихря сильно изгибается. Вихри теперь активно взаимодействуют с внешним течением, а также с топографией и друг с другом. Самодвижение такой пары направлено на запад, и несмотря на то, что вихревая структура по-прежнему сносится потоком на восток, его переносное движение значительно более слабое, чем на рисунке 7.

Первоначально красная сепаратриса, петля которой ассоциируется с антициклоническим свободным вихрем «2», находится ниже черной сепаратрисы топографического вихря (моменты времени $T = 0-1$). Напротив, синяя сепаратриса, петля которой сформировалась за счет циклонического вихря «1», находится выше этой сепаратрисы. По мере продвижения пары вихрей ($T = 1-3$) красная сепаратриса отодвигается выше на север. В моменты времени $T = 4-5$ антициклон проходит над топографией, что приводит к искривлению контура и увеличению площади петли

сепаратрисы топографического вихря. Объем жидкости, первоначально покрывающий топографический вихрь (зеленая область), вымывается из петли и сносится вниз по потоку ($T = 6-7.5$). В случае на рисунке 7 мы наблюдали похожую картину полной вентиляции топографического вихря, но теперь свободный антициклонический вихрь Π_{12} , проходя над топографией, почти не меняет свою форму и не захватывается гайотом.

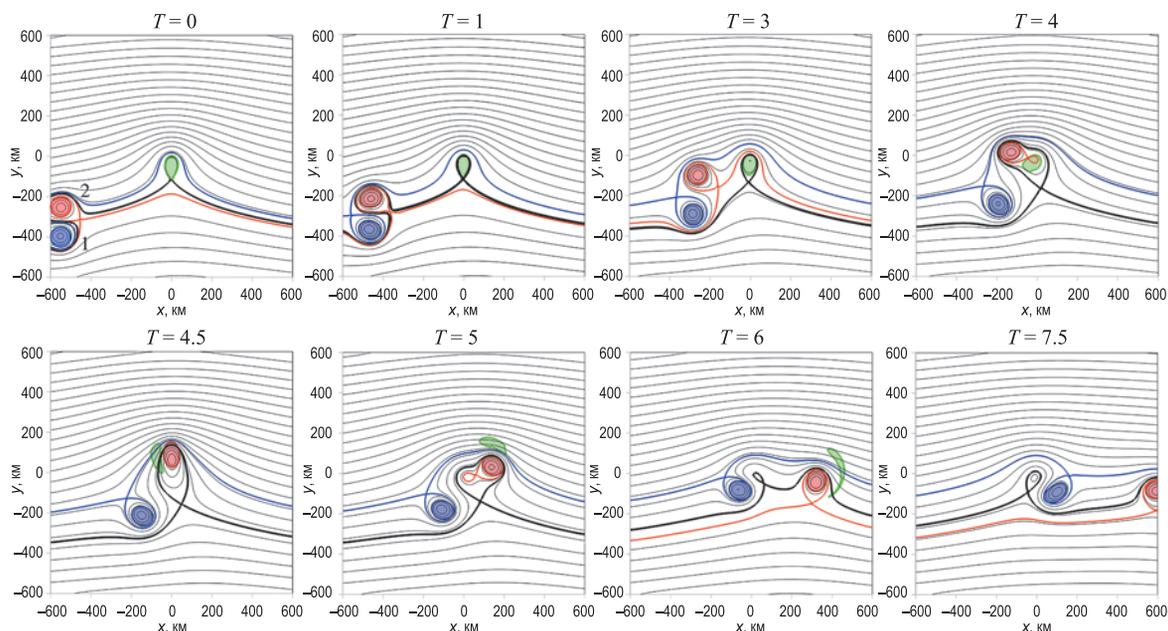


Рис. 9 – То же самое, что в верхней строке рисунка 7 (т. е. только для верхнего слоя), но при $\Pi_{11} = 1.4$ и $\Pi_{12} = -1.4$. Черная линия представляет собой сепаратрису поля функции тока, генерируемой гайотом, синяя и красная линии – сепаратрисы, формирующиеся, соответственно, за счет циклонического и антициклонического вихревых пятен верхнего слоя

Циклонический сильный свободный вихрь Π_{11} ведет себя так же отлично от слабого (рисунок 7). Он медленно продвигается на восток, проходя севернее топографического вихря. В моменты активного взаимодействия антициклона «2» и топографического вихря циклон «1» останавливается и продолжительное время ($T = 4-6$) находится у юго-западной периферии топографического вихря. Далее ($T = 6-7.5$) циклон «1» следует за антициклоном «2», продвигаясь вниз по потоку на восток и значительно сужая петлю сепаратрисы топографического вихря. При этом циклон «1» практически не теряет своей первоначально круговой формы.

На рисунке 10 представлена динамика двух сильных свободных поверхностных вихрей, обладающих самодвижением в восточном направлении (вдоль по потоку): $\Pi_{11} = -1.4$, $\Pi_{12} = 1.4$. Здесь в начальный момент времени образуются две дополнительные сепаратрисы по обе стороны от западной ветви сепаратрисы топографического вихря. В данном случае восточное фоновое течение существенно ускоряет продвижение пары по потоку на восток (по сравнению со слабой парой на рисунке 8).

Качественно динамика антициклона «1» слабо отличается от случая на рисунке 8. Антициклон «1» проходит южнее топографического вихря, продвигаясь по потоку, практически не теряя своей первоначально круговой формы.

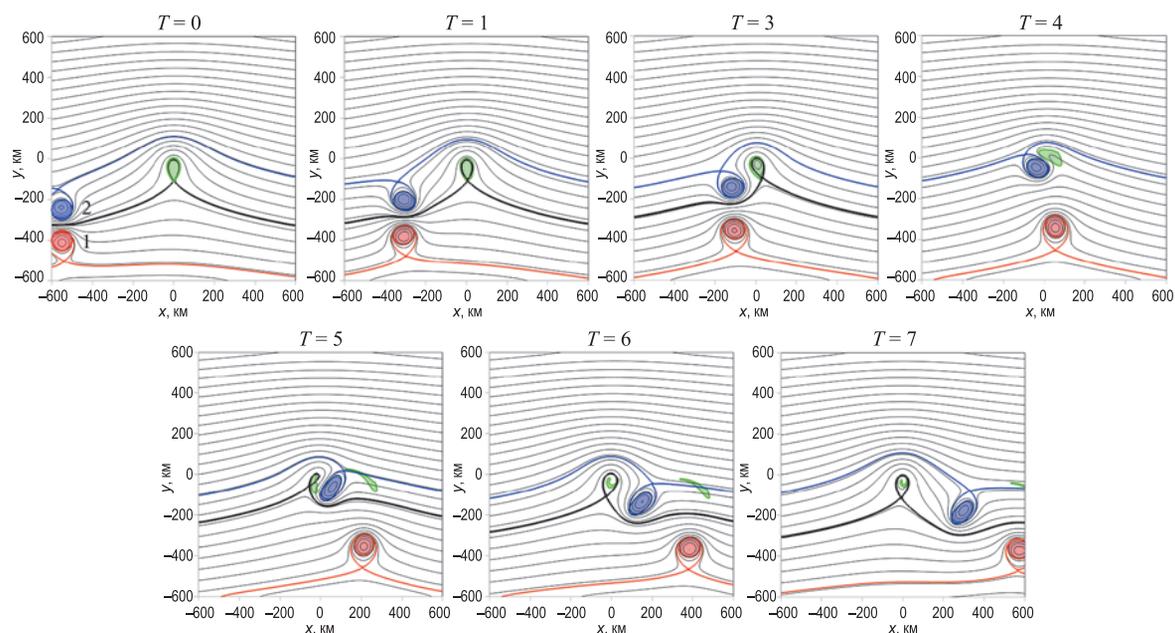


Рис. 10 – То же, что на рисунке 9, но при $\Pi_{11} = -1.4$ и $\Pi_{12} = 1.4$

Циклон «2» при прохождении окрестности топографического вихря не только уменьшает его объем, но и приводит к кратковременному его вырождению ($T = 4$). Объем примеси, первоначально заполнявшей топографический вихрь (зеленая область), вымывается из петли сепаратрисы и сносится вниз по потоку ($T = 3-6$). Часть примеси затем повторно захватывается топографическим вихрем в момент восстановления его сепаратрисы и удаления циклона «2» вниз по потоку ($T = 4-6$). При этом циклон «2» практически не теряет своей первоначально круговой формы.

Заключение

В рамках трехслойной квазигеострофической модели океана с использованием МКД получены качественные картины взаимодействия вихревых пятен с топографическим вихрем в зональном баротропном потоке. В частности, исследованы особенности вихревой вентиляции области антициклонического топографического вихря. Вихревые пятна положительной или отрицательной потенциальной завихренности и их парные комбинации, набегающие на топографический вихрь, приводят к различным сценариям обмена жидкостью между топографическим вихрем и внешним фоновым потоком, переносящим свободные вихревые пятна, во всех слоях.

Рисунки 3–4 показывают особенности взаимодействия с топографическим вихрем изолированных поверхностных вихревых пятен, первоначально находившихся

выше по потоку в окрестности западной ветви сепаратрисы поля функции тока. Антициклоническое вихревое пятно, приближаясь к гайоту, разрушает генерируемую им сепаратрису, создавая, таким образом, условия для полной вентиляции топографического вихря и кратковременно формирует свою собственную сепаратрису южнее горы, затем вторая из них разрушается, а первая, наоборот, восстанавливается, и часть антициклонического вихря захватывается топографией, вторая его часть уносится вниз по течению в виде небольшого компактного вихря и длинных вихревых нитей.

Циклоническое вихревое пятно взаимодействует, в основном, с южной периферией антициклонического топографического вихря, временно увеличивая его площадь. Часть пятна, вытянувшись в тонкую нить, огибает гору с севера, затем все его части уносятся вниз по течению в юго-восточном направлении. Топографического захвата не наблюдается, топографический вихрь испытывает незначительную вентиляцию.

По результатам выполненных экспериментов и теоретических соображений можно отметить следующие общие закономерности вихревого взаимодействия:

1. Слабое ($\Pi = \pm 0.2$) циклоническое вихревое пятно, первоначально расположенное *южнее* западной ветви сепаратрисы фазового портрета, ослабляет результирующее течение, продвигаясь по потоку, что приводит к усилению топографического вихря. Слабое антициклоническое вихревое пятно, переносимое потоком *южнее* сепаратрисы, наоборот, усиливает результирующее течение в окрестности топографического вихря, приводя к его ослаблению (вплоть до его временного вырождения).

2. При первоначальном расположении слабого вихревого пятна *севернее* западной ветви сепаратрисы эффект от соответствующих вихревых пятен меняется: циклоническое вихревое пятно усиливает результирующее течение и ослабляет топографический вихрь, а антициклоническое вихревое пятно образует противоположный эффект.

3. Парное воздействие вихревых пятен, первоначально расположенных севернее и южнее западной ветви сепаратрисы фазового портрета, может приводить как к усилению описанных выше эффектов, так и к их ослаблению. Отметим следующие характерные особенности:

а) Взаимодействие топографического вихря с двумя слабыми вихревыми пятнами одного знака завихренности, первоначально расположенными по обе стороны от западной ветви сепаратрисы и набегающими на гайот с восточным потоком, оказывается слабовыраженным в силу наложения противоположных эффектов усиления/ослабления результирующего течения вихревыми пятнами.

б) В случае взаимодействия топографического вихря со слабой вихревой парой восточного самодвижения (под самодвижением понимается движение вихревых пятен, обусловленное только их взаимодействием между собой) происходит усиление результирующего течения, что приводит к практически полному вырождению топографического вихря (полному вырождению *в случае сильных вихревых пятен*) в момент их максимального сближения.

Напротив, слабая вихревая пара западного самодвижения ослабляет результирующее течение, приводя к усилению (значительному *в случае сильной вихревой пары*) топографического вихря. Однако, со временем сильный циклонический вихрь затормаживается в окрестности южной периферии топографического вихря, а антициклон уносится потоком, что практически уничтожает «парный» эффект. Сильный циклон, находясь севернее сепаратрисы фазового портрета, усиливает результирующее течение и значительно ослабляет топографический вихрь.

Эффекты вихревой вентиляции во всех вышеперечисленных сценариях играют важную роль.

Обнаруженные нами эффекты вихревого взаимодействия, полученные для вихревых пятен и пятен примеси в окрестности гайота Затонского, очевидно, могут иметь место в окрестностях различных изолированных, близких к круговым, океанских возвышенностей.

Благодарности. Исследования выполнены в рамках тем № FMWZ-2025-0001 Государственного задания ИВП РАН и № FMWE-2023-0002 Государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН.

Список литературы

1. Альберг Дж., Нильсон Э., Уолли Дж. Теория сплайнов и ее приложения. М.: Мир, 1972. 316 с.
2. Егорова В. М. Вихревая динамика над неосесимметричной топографией дна во вращающейся стратифицированной жидкости (в приложении к Кипрскому вихрю): Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 1.6.17. М.: EDN EWOAWU, 2024. 101 с.
3. Зырянов В. Н. Топографические вихри в динамике морских течений. М.: ИВП РАН, 1995. 240 с.
4. Каменкович В. М., Кошляков М. Н., Монин А. С. Синоптические вихри в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 264 с.
5. Козлов В. Ф. Метод контурной динамики в модельных задачах о топографическом циклогенезе в океане // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1983. Т. 19. № 8. С. 845–854.
6. Козлов В. Ф. Модели топографических вихрей в океане. М.: Наука, 1984. 200 с.
7. Макаров В. Г. Комплекс программ для исследования методом контурной динамики плоских вихревых течений идеальной жидкости. В сб.: Метод контурной динамики в океанологических исследованиях. Владивосток: ДВО АН СССР, 1990. С. 28–39.
8. Макаров В. Г. Вычислительный алгоритм метода контурной динамики с изменяемой топологией исследуемых областей // Моделирование в механике. 1991. Т. 5 (22). № 4. С. 83–95.
9. Мельников М. Е., Седьшева Т. Е., Аганова Г. В., Анохин В. М. Особенности геоморфологического строения гайотов Магеллановых гор (Тихий океан) // Известия Российского географического общества. 2013. Т. 145. Вып. 6. С. 29–43.
10. Монин А. С., Жихарев Г. М. Океанские вихри // Успехи физических наук. 1990. Т. 160. Вып. 5. С. 1–47.

11. *Озмидов Р. В.* Диффузия примесей в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 278 с.
12. *Рыжов Е. А., Кошель К. В.* Вентилирование области топографического вихря захваченным свободным вихрем // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 6. С. 845–857.
13. *Соколовский М. А.* Моделирование трехслойных вихревых движений в океане методом контурной динамики // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1991. Т. 27. № 5. С. 550–562.
14. *Хайпер Э., Нерсетт С., Ваннер Г.* Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи. М.: Мир, 1990. 512 с.
15. *Шатохин М. В., Егорова В. М.* Динамика примеси во внешнем деформационном поле над подводной возвышенностью // Волны и вихри в сложных средах: Сборник материалов 15-ой международной конференции – школы молодых ученых, Москва, 19–22 ноября 2024 года. Москва: ООО «ИСПО-принт», 2024. С. 247–250.
16. *Шатохин М. В., Соколовский М. А.* Динамика пассивной примеси в поверхностном и подповерхностном слоях во внешнем деформационном поле над подводной возвышенностью в океане // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2023. № 3. С. 2330901–1–11. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2330901>.
17. *Alomar C., Estarellas F., Deudero S.* Microplastics in the Mediterranean Sea: Deposition in coastal shallow sediments, spatial variation and preferential grain size // Mar. Environ. Res. 2016. Vol. 115. P. 1–10.
18. *Davies P. A.* Experiments on Taylor columns in rotating, stratified fluids // Ph. D. thesis, University of Newcastle-upon-Tyne. 1971.
19. *Davies P. A.* Experiments on Taylor columns in rotating stratified fluids // J. Fluid Mech. 1972. Vol. 54. P. 691–718.
20. *Dritschel D. G.* The stability of elliptical vortices in an external straining flow // J. Fluid Mech. 1990. Vol. 210. P. 223–261.
21. *Egorova V. M., Sokolovskiy M. A., Zodiatis G. A.* Three-Layer Model of Hydrodynamic Processes in the Cyprus Eddy System // Ocean Dyn. 2024. Vol. 74. No. 1. P. 19–36.
22. *Egorova V. M., Zyryanov V. N., Sokolovskiy M. A.* The hydrodynamic theory of the Cyprus Eddy // Ocean Dyn. 2022. Vol. 72. No. 1. P. 1–20.
23. *Filyushkin B. N., Sokolovskiy M. A., Kozhelupova N. G., Vagina V. M.* Dynamics of intrathermocline lenses // Doklady Earth Sci. 2010. Vol. 434. No. 2. P. 1377–1380.
24. *Hide R.* Origin of Jupiter's Great Red Spot // Nature. 1961. Vol. 190. No. 4779. P. 75–76.
25. *Hogg N. G.* On the stratified Taylor column // J. Fluid Mech. 1973. Vol. 58. No. 3. P. 517–537.
26. *Liubartseva S., Coppini G., Lecci R., Clementi E.* Tracking plastics in the Mediterranean: 2D Lagrangian model // Mar. Pollut. Bull. 2018. Vol. 129. No. 1. P. 151–162.
27. *Melander M. V., Zabusky N. J., McWilliams J. C.* Asymmetric vortex merger in two dimensions: Which vortex is “victorious”? // J. Phys Fluids. 1987. Vol. 30. No. 9. P. 2610–2612.
28. *Pullin D. L.* Contour Dynamics Methods // Annu. Rev. Fluid Mech. 1992. Vol. 24. P. 89–115.
29. *Sokolovskiy M. A.* Stability analysis of the axisymmetric three-layered vortex using contour dynamics method // Comput. Fluid Dyn. J. 1997. Vol. 6. No. 2. P. 133–156.
30. *Sokolovskiy M. A., Verron J.* Dynamics of Vortex Structures in a Stratified Rotating Fluid // Switzerland: Springer, Atmos and Oceanogr Sci Lib. 2014. Vol. 47. 382 p.
31. *Taylor G. I.* Experiments with rotating fluids // Proc. Roy. Soc. Lond. Ser. A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character. 1921. Vol. 100. No. 703. P. 114–121.
32. *Taylor G. I.* Experiments on the motion of solid bodies in rotating fluids // Proc. Roy. Soc. Lond. Ser. A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character. 1923. Vol. 104. No. 725. P. 213–219.

33. *Zabusky N. J., Hughes M. H., Roberts K. V.* Contour dynamics for Euler equations in two dimensions // *J. Comput. Phys.* 1979. Vol. 30. No. 1. P. 96–106.
34. *Zyryanov V. N.* Topographic eddies in a stratified ocean // *Reg. Chaot. Dyn.* 2006. Vol. 11. No. 4. P. 491–521.

Статья поступила в редакцию 16.06.2025, одобрена к печати 03.09.2025.

Для цитирования: Шатохин М. В., Егорова В. М., Соколовский М. А. Исследование распространения вихревых пятен и пятен пассивной примеси в окрестности изолированной подводной горы в рамках трехслойной модели океана // *Океанологические исследования.* 2025. № 53 (3). С. 44–65. [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(3\).3](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(3).3).

THE STUDY OF VORTEX PATCHES PROPAGATION AND PASSIVE ADMIXTURE PATCHES IN THE VICINITY OF AN ISOLATED UNDERWATER MOUNTAIN WITHIN THE FRAMEWORK OF THE THREE-LAYER OCEAN MODEL

M. V. Shatokhin¹, V. M. Egorova¹, M. A. Sokolovskiy^{1,2}

¹ *Water Problem Institute, Russian Academy of Science,
3, ul. Gubkina, Moscow, 119333, Russia;*

² *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,*

e-mail: shatokhin_m9@mail.ru; vikchik96@yandex.ru; sokolovskiy@iwp.ru

Within the framework of the three-layer quasi-geostrophic model in the f -plane approximation, the study of the effect of a topographic anticyclone formed over an isolated underwater mountain on the movement of a surface, subsurface or bottom vortex spot, or a passive admixture spot transported by a zonal vertically homogeneous current, was conducted using the contour dynamics method. In particular, the possibility of partial capture of a vortex spot by a quasi-stationary topographic vortex was shown.

Keywords: three-layer ocean model, topographic eddy, passive admixture, vortex interaction, vortex ventilation, contour dynamics method

References

1. Al'berg, Dzh., E. Nil'son, and Dzh. Uolsh, 1972: *Teoriya splajnov i ee prilozheniya (The Theory of Splines and Their Applications)*. Moscow, Mir, 316 p.
2. Alomar, C., F. Estarellas, and S. Deudero, 2016: Microplastics in the Mediterranean Sea: Deposition in coastal shallow sediments, spatial variation and preferential grain size. *Mar. Environ. Res.*, **115**, 1–10.
3. Davies, P. A., 1971: *Experiments on Taylor columns in rotating, stratified fluids*. Ph.D. thesis, University of Newcastle-upon-Tyne.
4. Davies, P. A., 1972: Experiments on Taylor columns in rotating stratified fluids. *J. Fluid Mech.*, **54**, 691–718.

5. Dritschel, D. G., 1990: The stability of elliptical vortices in an external straining flow. *J. Fluid Mech.*, **210**, 223–261.
6. Egorova, V. M., M. A. Sokolovskiy, and G. A. Zodiatis, 2024: Three-Layer Model of Hydrodynamic Processes in the Cyprus Eddy System. *Ocean Dyn.*, **74** (1), 19–36.
7. Egorova, V. M., V. N. Zyryanov, and M. A. Sokolovskiy, 2022: The hydrodynamic theory of the Cyprus Eddy. *Ocean Dyn.*, **72** (1), 1–20.
8. Egorova, V. M., 2024: *Vihrevaya dinamika nad neosesimmetrichnoj topografiej dna vo vrashchayushchejsya stratificirovannoj zhidkosti (v prilozhenii k Kiprskomu vihryu) (Vortex dynamics over non-axisymmetric bottom topography in a rotating stratified fluid (with application to the Cyprus Eddy))*: Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk: 1.6.17. EDN EWOAWU, Moscow, 101 p.
9. Filyushkin, B. N., M. A. Sokolovskiy, N. G. Kozhelupova, and V. M. Vagina, 2010: Dynamics of intrathermocline lenses. *Doklady Earth Sci.*, **434** (2), 1377–1380.
10. Hajrer, E., S. Nersett, and G. Vanner, 1990: *Reshenie obyknovennykh differencial'nykh uravnenij. Nezhestkie zadachi (Solving Ordinary Differential Equations. I: Nonstiff Problems)*. Moscow, Mir, 512 p.
11. Hide, R., 1961: Origin of Jupiter's Great Red Spot. *Nature*, **190** (4779), 75–76.
12. Hogg, N. G., 1973: On the stratified Taylor column. *J. Fluid Mech.*, **58** (3), 517–537.
13. Kamenkovich, V. M., M. N. Koshlyakov, and A. S. Monin, 1987: *Sinopticheskie vihri v okeane (Synoptic Eddies in the Ocean)*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 264 p.
14. Kozlov, V. F., 1983: Metod konturnoj dinamiki v model'nykh zadachah o topograficheskom ciklogeneze v okeane (Contour dynamics method in model problems of topographic cyclogenesis in the ocean). *Izvestia AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, **19** (8), 845–854.
15. Kozlov, V. F., 1984: *Modeli topograficheskikh vihrej v okeane (Models of Topographic Eddies in the Ocean)*. Moscow, Nauka, 200 p.
16. Liubartseva, S., G. Coppini, R. Lecci, and E. Clementi, 2018: Tracking plastics in the Mediterranean: 2D Lagrangian model. *Mar. Pollut. Bull.*, **129** (1), 151–162.
17. Makarov, V. G., 1990: Kompleks programm dlya issledovaniya metodom konturnoj dinamiki ploskih vihrevykh techenij ideal'noj zhidkosti (The software package for studying the contour dynamics of plane vortex flows of an ideal fluid). V sb.: *Metod konturnoj dinamiki v okeanologicheskikh issledovaniyah*. Vladivostok, DVO AN SSSR, 28–39.
18. Makarov, V. G., 1991: Vychislitel'nyj algoritm metoda konturnoj dinamiki s izmenyaemoj topologiej issleduemyh oblastej (The computational algorithm of the contour dynamics method with variable topology of the studied areas). *Modelirovanie v mekhanike*, **5** (4), 83–95.
19. Melander, M. V., N. J. Zabusky, and J. C. McWilliams, 1987: Asymmetric vortex merger in two dimensions: Which vortex is “victorious”? *J. Phys. Fluids*, **30** (9), 2610–2612.
20. Mel'nikov, M. E., T. E. Sedysheva, G. V. Aganova, and V. M. Anohin, 2013: Osobennosti geomorfologicheskogo stroeniya gajotov Magellanovykh gor (Tihij okeana) (Features of the geomorphological structure of the guyots of the Magellan Mountains (Pacific Ocean)). *Izvestiya Rossijskogo geograficheskogo obshchestva*, **145** (6), 29–43.
21. Monin, A. S. and G. M. Zhiharev, 1990: Okeanskie vihri (Ocean eddies). *Uspekhi fizicheskikh nauk*, **160** (5), 1–47.
22. Ozmidov, R. V., 1986: *Diffuziya primesej v okeane (Diffusion of Impurities in the Ocean)*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 278 p.
23. Pullin, D. L., 1992: Contour Dynamics Methods. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **24**, 89–115.
24. Ryzhov, E. A. and K. V. Koshel', 2011: Ventilirovanie oblasti topograficheskogo vihrya zahvachennym svobodnym vihrem (Ventilation of the topographic vortex region by a captured free vortex). *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana.*, **47** (6), 845–857.

25. Sokolovskiy, M. A., 1991: Modelirovanie trekhslonnykh vikhrevykh dvizhenij v okeane metodom konturnoj dinamiki (Modeling of three-layer eddy motions in the ocean using the contour dynamics method). *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, **27** (5), 550–562.
26. Sokolovskiy, M. A., 1997: Stability analysis of the axisymmetric three-layered vortex using contour dynamics method. *J. Comput. Fluid Dyn.*, **6** (2), 133–156.
27. Sokolovskiy, M. A. and J. Verron, 2014: *Dynamics of Vortex Structures in a Stratified Rotating Fluid*. Switzerland: Springer, Atmos and Oceanogr Sci Lib. **47**, 382 p.
28. Shatohin, M. V. and V. M. Egorova, 2024: Dinamika primesi vo vneshnem deformacionnom pole nad podvodnoj vozvyshennost'yu (Dynamics of admixture in the external deformation field above an underwater elevation). *Volny i vikhri v slozhnykh sredah: Sbornik materialov 15-j mezhdunarodnoj konferencii – shkoly molodyh uchenykh*, Moskva, 19–22 noyabrya 2024 g., Moscow, OOO “ISPO-print”, 247–250.
29. Shatohin, M. V. and M. A. Sokolovskiy, 2023: Dinamika passivnoj primesi v poverhnostnom i podpoverhnostnom sloyah vo vneshnem deformacionnom pole nad podvodnoj vozvyshennost'yu v okeane (Dynamics of passive admixture in surface and subsurface external deformation field above an ocean guyot). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3: Fizika. Astronomiya*, **3**, 2330901-1-11, <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2330901>.
30. Taylor, G. I., 1921: Experiments with rotating fluids. *Proc. Roy. Soc. Lond. Ser. A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, **100** (703), 114–121.
31. Taylor, G. I., 1923: Experiments on the motion of solid bodies in rotating fluids. *Proc. Roy. Soc. Lond. Ser. A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, **104** (725), 213–219.
32. Zabusky, N. J., M. H. Hughes, and K. V. Roberts, 1979: Contour dynamics for Euler equations in two dimensions. *J. Comput. Phys.*, **30** (1), 96–106.
33. Zyryanov, V. N., 1995: *Topograficheskie vikhri v dinamike morskikh techenij (Topographic Eddies in the Dynamics of Sea Currents)*. Moscow, IVP RAN, 240 p.
34. Zyryanov, V. N., 2006: Topographic eddies in a stratified ocean. *Reg. Chaot. Dyn.*, **11** (4), 491–521.

Submitted 16.06.2025, accepted 03.09.2025.

For citation: Shatohin, M. V., V. M. Egorova, and M. A. Sokolovskiy, 2025: The study of vortex patches propagation and passive admixture patches in the vicinity of an isolated underwater mountain within the framework of the three-layer ocean model. *Journal of Oceanological Research*, **53** (3), 44–65, [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(3\).3](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(3).3).