

АВТОСОЛИТОН РОССБИ

С.В. Антипов, М.В. Незлин, А.С. Трубников

Экспериментально реализован новый нелинейный физический объект – автосолитон Россби – незатухающий уединенный дрейфующий антициклонический вихрь, самоорганизующийся во встречных течениях во вращающейся мелкой воде. Его можно рассматривать как стационарную солитонную модель Большого Красного Пятна Юпитера, впервые реализованную в эксперименте.

Автосолиiton Россби, созданный в данной работе ¹⁾, обладает тремя свойствами, принципиально выделяющими его из класса уединенных геострофических вихрей, изучавшихся в наших предыдущих работах ¹⁻³. Во-первых, он не подвержен вязкому затуханию и существует неограниченно долгое время (для сравнения отметим, что время вязкого затухания солитона Россби в опытах ¹⁻³ не превышало 20 с). Во-вторых, он — аналогично глобальным вихрям в атмосферах планет ⁴ — представляет собой одиночное образование, а не является элементом замкнутой цепочки вихрей, наблюдавшейся нами ранее ²⁻⁴. В-третьих, для его создания не требуется специального источника: автосолиiton генерируется вследствие нелинейной эволюции неустойчивых встречных течений во вращающейся мелкой воде и так перестраивает их пространственный профиль, чтобы новый профиль соответствовал стационарной структуре генерируемого солитона. Таким образом, рассматриваемый автосолиiton является результатом нелинейной самоорганизации солитона Россби в системе геострофических течений.

Экспериментальная установка построена на основе того же сосуда с параболическим профилем дна, в котором нами в прежних опытах ¹⁻³, в качественном согласии с теорией ⁵, наблюдались солитоны Россби в слое мелкой воды, вращающейся вместе с сосудом (диаметр сосуда 28 см). Рабочая жидкость (вода, толщина слоя 0,5 см) подвержена воздействию двух встречных течений, распространяющихся вдоль "параллелей" вокруг оси системы. Течения относительно сосуда создаются дифференциальным движением двух участков его дна, которые вращаются относительно сосуда в противоположные стороны и увлекают расположенные над ними слои жидкости. Внутренний участок — это вся центральная часть дна диаметром 10 см, внешний — кольцо шириной 2,5 см, отстоящее от внутреннего участка на 11 см вдоль "меридиана" на параболоиде (между ними — участок параболоида, вращающийся как целое). Основные результаты работы состоят в следующем.

1. При указанном значительном взаимном удалении течений их неустойчивость, как и в ^{2,3} приводит к генерации крупномасштабных вихревых структур (с размерами, превышающими радиус (1) Россби — Обухова) только при антициклоническом направлении течений, когда их ротор скорости антипараллелен вектору угловой скорости параболоида; если же ротор (достаточно удаленных) течений — циклонический, то крупномасштабные вихревые структуры не генерируются. Эта циклон-антициклонная асимметрия является принципиальным фактом и обусловлена тем, что крупные антициклоны могут быть солитонами Россби, а крупные циклоны — нет (они быстро распадаются). Последние могут быть стационарными лишь в том случае, когда они генерируются течениями с весьма резким профилем скорости, характерный размер которого меньше радиуса (1) Россби — Обухова; такие вихри представляют собой вынужденные моды и не являются солитонами ⁴.

2. На рис. 1 дана картина течений (антициклонического направления) и генерируемой ими вихревой структуры — в виде фотографий, сделанных аппаратом, вращающимся вместе с изучаемым вихрем. Основным элементом этой картины является вихрь приблизительно эллиптической формы, существующий в течение произвольно долгого времени, дрейфующий против направления глобального вращения системы и представляющий собой антициклон — возвышение жидкости, вращающееся против направления вращения сосуда. Размеры вихря вдоль параллели и вдоль меридиана — около 6 см, т.е. около $(3 \div 4)r_R$, где

$$r_R = (g^* H_0)^{1/2} / 2\Omega_0 \cos \alpha \quad (1)$$

радиус Россби — Обухова; H_0 — глубина жидкости, Ω_0 — угловая частота вращения системы, g^* — ускорение силы тяжести (с учетом центробежной силы от глобального вращения), α — угол наклона местной нормали (вертикали) к оси вращения системы. Скорость дрейфа

1) Мы применяем термин "автосолиiton", следуя Б.С.Кернеру и В.В.Осипову, для обозначения самоподдерживающегося (незатухающего) солитона.

рассматриваемого вихря составляет около 8 см/с и приблизительно равна характерной скорости Россби¹.

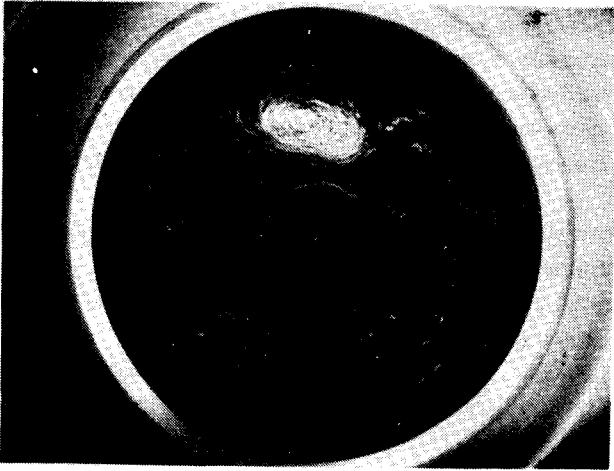


Рис. 1

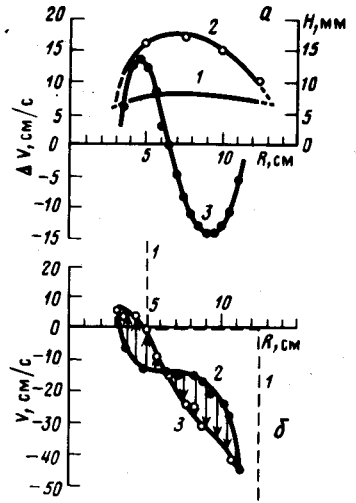


Рис. 2

Рис. 1. Пример визуализации автосолитона Россби (вид сверху). Середина слоя мелкой воды вращается быстрее периферии. Белые черточки – треки пробных частиц, плавающих на поверхности жидкости на фоне черного дна параболоида; $\Omega_0 = 12,6 \text{ с}^{-1}$, выдержка фотоаппарата – $\frac{1}{3} \text{ с}$. Расстояние центра вихря от оси вращения – около 6 см

Рис. 2. а – Профили глубины жидкости в меридиональном сечении вращающегося параболоида: зависимость глубины жидкости от расстояния до оси вращения (глубина, как обычно, измеряется по нормали к поверхности дна в данной точке). 1 – в области, диаметрально противоположной вихрю, 2 – в области вихря. Кривая 3 – профиль скорости внутри вихря; скорость измеряется по отношению к течению, как показано стрелками на рис. 2, б. б – Профили линейной азимутальной скорости частиц на поверхности жидкости в системе вращающегося сосуда: зависимость скорости от расстояния до оси сосуда. 1 – в отсутствие вихря, 2 – в режиме генерации вихря, в области, диаметрально противоположной вихрю, 3 – внутри вихря

3. На рис. 2, а показаны профили высоты жидкости: 1 – вне вихря (на диаметрально противоположной от него стороне сосуда), 2 – внутри вихря. На рис. 2, б показаны профили скоростей в вихре и течениях. Видно, что вихрь (возникающий вследствие неустойчивости течений) радикально перестраивает их профиль: если до возникновения вихря профиль течений имел вид ступенчатой функции 1, то в режиме с вихрем этот профиль имеет вид плавной кривой 2. Профиль скорости в самом вихре изображается двумя кривыми 3 – на рис. 2, б и 2, а; в последнем случае скорости частиц в вихре (обозначаемые Δv) измеряются по отношению к течению, как это показано на рис. 2, б стрелками между кривыми 2 и 3 (за положительное направление скорости принято, как обычно^{2,3}, направление в сторону вращения системы). И поскольку изучаемый вихрь формируется в той области между течениями, где их скорость проходит через нуль, то течения с новым профилем оказываются согласованными с пространственной структурой вихря и поддерживают его стационарное состояние, “раскручивая” вихрь и компенсируя его вязкие (и, возможно, иные) потери.

4. Максимальная скорость вращения вихря относительно течений составляет около 15 см/с и значительно превосходит скорость дрейфа вихря, что как раз соответствует наличию в вихре ярко выраженной области захваченных частиц, как это отчетливо видно из рис. 1 (см. по этому поводу¹). Максимальная завихренность, или ротор вихря, значительно (в 5 – 6 раз)

превосходит ротор течения вне вихря (на диаметрально противоположной стороне сосуда) — так, как это имеет место у крупных вихрей в атмосферах планет ⁶.

5. Рассматриваемый вихрь весьма нетривиально отличается от цепочки стационарных антициклонов, наблюдавшейся нами в ^{2,3}, тем, что он — один на всем периметре параболоида.

Таким образом, полученный в данной работе уединенный вихрь сочетает в себе все свойства солитона Россби (его размеры, направление дрейфа и собственного вращения, скорость дрейфа) с отсутствием затухания. Это позволяет считать, что он представляет собой автосолитон Россби, или реализацию стационарной лабораторной модели Большого Красного Пятна Юпитера, существенно поддерживающую солитонную теорию этого замечательного явления Природы ^{7,5,4,8}.

Автосолитон Россби генерируется центробежной неустойчивостью течений, которая возникает, когда внутренняя часть "мелкой воды" вращается быстрее периферии, т.е. той же самой неустойчивостью, которая в других условиях эксперимента ⁹ моделирует механизм формирования спиральной структуры галактик.

Авторы выражают благодарность Б.Б.Кадомцеву за интерес к работе и ее поддержку.

Литература

1. Антипов С.В., Незлин М.В., Снежкин Е.Н., Трубников А.С. Письма в ЖЭТФ, 1981, 33, 368; ЖЭТФ, 1982, 82, 145.
2. Незлин М.В., Снежкин Е.Н., Трубников А.С. Письма в ЖЭТФ, 1982, 36, 190.
3. Антипов С.В., Незлин М.В., Родионов В.К., Снежкин Е.Н., Трубников А.С. ЖЭТФ, 1983, 84, 1357.
4. Незлин М.В. Письма в Астрон. журн., 1984, 10, 530; Письма в ЖЭТФ, 1981, 34, 83.
5. Петвашивили В.И. Письма в ЖЭТФ, 1980, 32, 632; Письма в Астрон. журн., 1983, 9, 253.
6. Ingersoll A.P., Cuong P.G. Journ. Atm. Sci., 1981, 38, 2067.
7. Maxworthy T., Redekopp L.G. Icarus, 1979, 29, 261; Science, 1980, 210, 1350.
8. Сагдеев Р.З., Шапиро Е.Д., Шевченко В.И. Письма в Астрон. журн., 1981, 7, 505.
9. Морозов А.Г., Незлин М.В., Снежкин Е.Н., Фридман А.М. Письма в ЖЭТФ, 1984, 39, 504.