

О ДРЕЙФОВЫХ СОЛИТОНАХ В МЕЛКОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ

*Р.А. Антонова, Б.П. Жвания, Дж.Г. Ломинадзе,
Дж.И. Нанобашвили, В.И. Петвиашвили*

На мелкой воде во вращающемся параболическом сосуде получены уединенные циклоны и антициклоны, а также уединенная пара циклон-антициклон, характерный размер которых порядка длины Россби – Обухова. Визуально наблюдалась перекачка энергии из мелких вихрей в крупные.

Наблюдение волн на воде и в настоящее время дает новые результаты и способствует пониманию сложных явлений в различных областях физики. Примером тому может служить получение солитонов-антициклонов в мелкой вращающейся жидкости ^{1, 2}, что выявило ряд свойств дрейфовых волн в плазме и пятен в атмосфере Юпитера, а также пополнило малочисленный класс экспериментально наблюдаемых неодномерных солитонов.

В работах ^{1, 3} показано, что уравнения дрейфовых волн в плазме и волн Россби после упрощающих приближенных преобразований приводятся к одному и тому же модельному уравнению, имеющему стационарное решение в виде уединенных двумерных солитонов-антициклонов, размер которых больше характерного размера дисперсии. Там же указано, что такие солитоны должны возникать в мелкой жидкости, находящейся во вращающемся сосуде, с

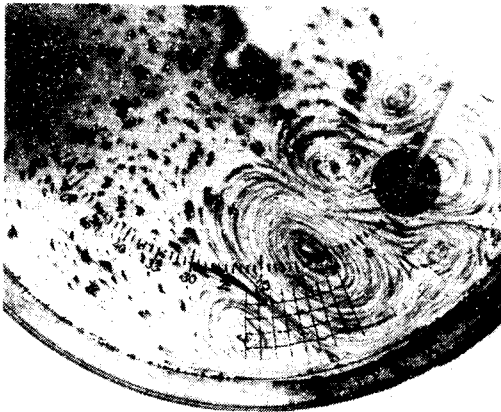
профилем дна, близким к параболе. Этим способом в работах ^{2,4-6} действительно удалось реализовать уединенные антициклоны.

Однако размеры сосуда в этих работах были недостаточно большие для наблюдений относительно более мелкомасштабных вихрей.

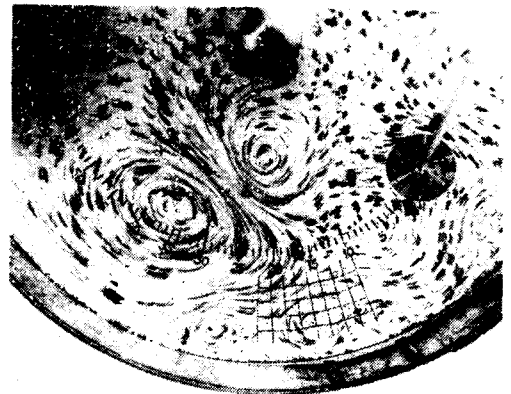
Для получения и исследования вихрей, горизонтальный размер которых порядка или меньше размера дисперсии (но много больше глубины жидкости) в Абастуманской астрофизической обсерватории была собрана установка — вращающийся параболический сосуд, размеры которого (диаметр — 86 см, радиус кривизны в вершине — 92 см) примерно в три раза больше, чем в экспериментах ^{2,4-6}. Период вращения сосуда, равный 1,9 с, позволяет помимо фоторегистрации вихрей (осуществляемой с помощью фотоаппарата, вращающегося вместе с сосудом), наблюдать их визуально.

Методы возбуждения вихрей и измерения скорости жидкости в них аналогичны использованным в работе ⁴. Скорость жидкости в вихре оценивается по экспозиции и длине следов бумажных кружочков, плавающих на поверхности жидкости, а вихри возбуждаются кратковременным вращением диска, вмонтированного в дно сосуда.

Эксперименты проводились при разных глубинах жидкости в интервале 2 ÷ 4 см, когда градиент глубины был мал, потому что в выражении скорости Россби v_R (1) этот градиент входит с большим коэффициентом, так что даже малая погрешность в измерении градиента делает v_R неопределенной. Для устранения влияния ветра, заметно искажающего картину, сосуд накрывался прозрачной крышкой. Влияние вязкости и поверхностного натяжения из-за больших размеров было пренебрежимо малым, что важно для сравнения с теорией.



а



б

Рис.1, а, б. Перекачка энергии в вихревой турбулентности с образованием пары циклон -антициклон. Интервал между кадрами 7,5 с. Здесь и на последующих рисунках глубина жидкости 2,5 см, длина Россби совпадает с диаметром возбуждающего диска на правой стороне рисунка. Размеры можно оценить по сантиметровой шкале вдоль широты на дне сосуда

Указанные изменения параметров системы привели к качественно новым результатам. Благодаря сравнительно большой глубине слоя жидкости удалось реализовать равноправную пару циклон-антициклон (рис.1), предсказанную теоретически Ларичевым и Резником ⁷, и довольно неожиданное образование — уединенный циклон (рис.2) (вихрь, с вогнутой поверхностью, вращающийся в сторону вращения сосуда и бегущий как и антициклон в направлении против вращения сосуда). Скорость циклона в случае его движения вдоль параллели должна быть больше скорости Россби (1), однако определить последнюю с достаточной точностью трудно. Легко возбуждаются и уединенные антициклоны (вихри с выпуклой поверхностью, в которых жидкость вращается против направления вращения сосуда). Скорость антицикло-

на при перемещении вдоль параллели (рис.3) близка к скорости циклонов. Экспериментально наблюдалось интересное явление – перекачка энергии по масштабам в вихревой турбулентности, часто рассматриваемая в теоретических работах. В этом случае, с помощью диска возбуждалось множество плотно упакованных вихрей (рис.1). В результате их взаимодействия малые вихри исчезали и образовывалась пара сравнительно крупных стоячих вихрей, напоминающая циклон-антициклонную уединенную пару.

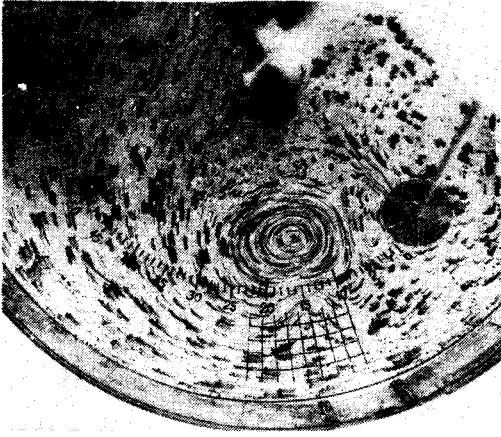


Рис.2. Циклон. Расстояние до оси сосуда 30 см. скорость перемещения 2,4 см/с

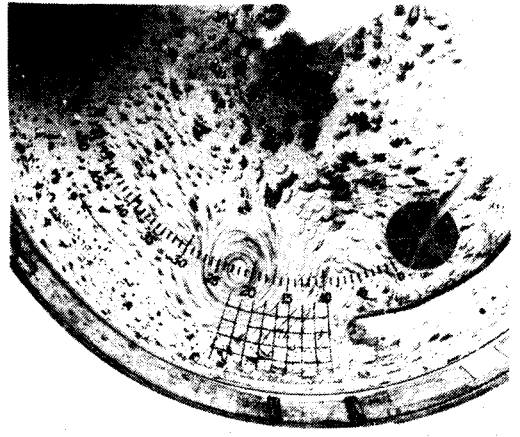


Рис.3. Антициклон. Скорость перемещения 2,4 см/с. Видна сепаратриса линий тока

В ряде случаев было видно, как циклоны или антициклоны излучали волны и постепенно отклонялись к „северу” или „югу” от начальной широты. Согласно теории, если скорость перемещения вихря больше v_R , излучение не происходит из-за дисперсионной экранировки, поскольку скорость малых волн меньше v_R , и поэтому они не могут быть в резонансе с вихрем. Это видно из дисперсионного уравнения волн Россби:

$$\omega = \frac{k_x v_R}{1 + k^2 r_R^2}; \quad v_R = \frac{H_0 \omega_0 r}{2 \mu R_0} \left(1 + \frac{\mu^3 R_0^2}{r H_0} \frac{\partial H_0}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где \mathbf{k} – волновой вектор, $r_R^2 = H_0 R_0 \mu^3 / 4$, r – расстояние от оси сосуда до центра вихря, R_0 – радиус кривизны в вершине параболоида, ω_0 – угловая скорость вращения сосуда, $\mu^2 = 1 + (r/R_0)^2$ невозмущенная глубина ω_0 может зависеть от широты y , направленной к краю сосуда, x – координата вдоль широты.

Из (1) видно, что пакет волн Россби в пренебрежении нелинейными эффектами должен расплываться из-за дисперсии (зависимости групповой скорости от волнового числа). Это расплывание особенно сильно, если $\Delta k r_R \gtrsim 1$, где Δk – разброс волновых чисел в пакете, что имеет место для полученных здесь вихрей. Характерное время расплывания в этом случае, как видно из (1), по порядку величины равно: $t_D \sim r_R / v_R$, что для вихрей, приведенных на рисунках ($r_R = 9$ см, $v_R = 2$ см/с, $r = 30$ см), составляет 4 с. Время жизни наблюдаемых вихрей составляет 20 – 40 с, что в 5 – 10 раз больше t_D , поэтому можно полагать, что мы имеем компенсацию дисперсионного расплывания нелинейным самосжатием, что характерно именно для солитонов. На рис. 2 – 3 скорость вращения жидкости максимальна на расстоянии $\sim r_R$ от центра вихря и близка к 5 см/с, что больше скорости перемещения вихря, так что имеется область захваченных частиц, впервые замеченных в [4], перемещающихся вместе с вихрем. По скорости вращения можно оценить амплитуду возмущения поверхности, исходя

из баланса между градиентом давления и силой Кориолиса. Отношение H_0 к возмущению поверхности вихрем в нашем случае оказывается больше 5, что подтверждается визуальным наблюдением.

Угловая скорость вращения жидкости в вихрях примерно в 6 раз меньше ω_0 . По-видимому, наблюдаемые здесь парные солитоны в виде циклон-антициклон согласуются с решением обычного геострофического уравнения, найденным в работе ⁷, которое справедливо при $kr_R \geq 1$. В обратном случае $k^2 r_R^2 \ll 1$ в работах ^{1, 3} было показано, что возможны только антициклоны, что согласуется с наблюдениями группы М.В.Незлина ^{2, 4-6}. В работе ⁵ тоже наблюдалась пара циклон-антициклон, но скорость вращения в циклоне была „явно меньше“, чем в антициклоне и поэтому сделан вывод о „вторичности циклонов“. Это неравноправие можно объяснить промежуточным значением характерной величины kr_R .

Авторы выражают благодарность Г.Н.Мусхлешвили за большую помощь в работе.

Литература

1. Петвиашвили В.И. Письма в ЖЭТФ, 1980, 32, 632.
2. Антипов С.В., Незлин М.В., Снежкин Е.Н., Трубников А.С. Письма в ЖЭТФ, 1981, 33, 368.
3. Петвиашвили В.И. Письма в АЖ, 1983, 9, 253.
4. Антипов С.В., Незлин М.В., Родионов В.К., Снежкин Е.Н., Трубников А.С. Письма в ЖЭТФ, 1982, 35, 521.
5. Антипов С.В., Незлин М.В., Снежкин Е.Н., Трубников А.С., ЖЭТФ, 1982, 82, 145.
6. Антипов С.В., Незлин М.В., Родионов В.К., Снежкин Е.Н., Трубников А.С. ЖЭТФ, 1983, 84, 1357.
7. Ларичев В.Д., Резник Г.М. ДАН СССР, 1976, 231, 1077.

Абастуманская астрофизическая обсерватория
Академии наук Грузинской ССР
Институт атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
7 апреля 1983 г.
После переработки
5 мая 1983 г.