

СОЛИТОН РОССБИ

*С.В.Антипов, М.В.Незлин, Е.Н.Снежкин,
А.С.Трубников*

Впервые экспериментально обнаружен солитон Россби, представляющий собой геострофический вихрь – антициклон. Солитон образуется в слое "мелкой воды", вращающейся в сосуде параболической формы (вместе с сосудом), и движется навстречу вращению, сохраняя свою форму – неизменный профиль высоты. Легкость возбуждения солитона – несмотря на существенную вязкость и трение – дает основание для поддержки существующей теоретической модели [4], согласно которой Большое Красное Пятно Юпитера есть не что иное, как солитон Россби. †

В физике атмосферы хорошо известны волны Россби, возникающие в атмосфере (или океане) вращающейся планеты вследствие пространственной неоднородности (зависимости от широты) силы Кориолиса [1]. По своим характеристикам они в большой степени аналогичны дрейфовым волнам в замагниченной плазме с неоднородной плотностью [2] или температурой [3]. Недавно в теоретической работе [4] было показано, что волны Россби могут формировать солитоны, подобные плазменным дрейфовым солитонам, и была предложена модель, согласно которой знаменитое Красное Пятно Юпитера представляет собой солитон Россби. Данная работа предпринята с целью экспериментальной проверки этой модели.

При постановке эксперимента мы исходили из необходимости проверки основных выводов теории [4], которые состоят в следующем.

1. Солитон Россби представляет собой "локальный" вихрь в слое вращающейся мелкой жидкости, глубина которой мала по сравнению с размерами вихря. Его осью является нормаль к поверхности жидкости в центре вихря. Высота жидкости в вихре Россби больше, чем вне его. Вихрь вращается в направлении, противоположном глобальному вращению жидкости, и представляет собой "бугор" на ее поверхности. Иными словами, это антициклон, в котором реализуется так называемое геострофическое равновесие: избыток гидростатического давления уравнивается силой Кориолиса, действующей на круговой ток частиц вокруг оси вихря [1].

2. Солитон Россби перемещается (дрейфует) в широтном направлении, противоположном глобальному вращению жидкости. При этом форма солитона – профиль высоты жидкости – сохраняется: дисперсионное распывание вихря компенсируется нелинейностью. Скорость перемещения солитона несколько больше фазовой скорости *линейной* волны Россби, которая определяется следующим соотношением:

$$v_{\phi} = \frac{gH_0 \sin \alpha_0}{2\omega_0 R \cos^2 \alpha_0}, \quad (1)$$

где g – ускорение силы тяжести, H_0 – невозмущенная высота жидкости, $\omega_0 = 2\pi f_0$ – угловая скорость ее глобального вращения, R – радиус кривизны поверхности жидкости в ее меридианальном сечении в центре вихря, α_0 – угол между осью глобального вращения жидкости и нормалью к ее поверхности.

3. Характерный размер (диаметр) солитона Россби, $2a$, определяется соотношением

$$2a \approx 3,5 |r_0| h^{-1/2}, \quad (2)$$

где $h = \frac{H}{H_0} - 1$ – относительная амплитуда солитона, H – высота жидкости в солитоне, $r_0 = \frac{(gH_0)^{1/2}}{2\omega_0 \cos \alpha_0}$ – радиус Россби.

Величина h является в теории малым параметром; тем не менее, можно проводить качественное сравнение теории с экспериментом даже при $h \rightarrow 1$.

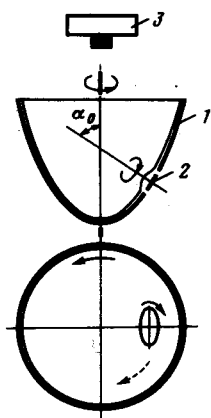


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – сосуд с параболическим профилем дна; 2 – вращающийся диск; 3 – кинокамера. На виде сверху пунктирной стрелкой показано направление дрейфа солитона Россби – солитон отстает от глобального движения жидкости

В качестве объекта для возбуждения солитона Россби мы — по предложению Петвиашвили [4] — выбрали "мелкую воду" приблизительно постоянной глубины в сосуде с параболическим дном, вращающемся вокруг вертикальной оси симметрии — рис. 1; максимальный внутренний диаметр параболоида — 28 см. При частоте вращения $f_0 = 1,8$ Гц вода покрывала дно сосуда ровным слоем глубиной $H_0 \approx 0,3 \div 0,5$ см. Форма поверхности воды в меридианальном сечении, т.е. в сечении вертикальной плоскостью, проходящей через ось, соответствовала уравнению.

$$gz = \frac{1}{2} \omega_0^2 r^2 \quad \text{или} \quad z = 6 \cdot 10^{-2} r^2, \quad (3)$$

где z и r — вертикальная и горизонтальная координаты точки на поверхности жидкости. В такой модельной ситуации гидростатическое давление жидкости определяется равнодействующей силы тяжести и центробежной силы от глобального вращения жидкости. Пространственная неоднородность ускорения $g/\cos \alpha$ равнодействующей силы изменяет фазовую скорость линейной волны Россби:

$$v_\Phi = \frac{gH_0 \sin \alpha_0}{\omega_0 R \cos^3 \alpha_0} = H_0 \omega_0 \sin \alpha_0 \quad (4)$$

(здесь использовано (3) и общеизвестное выражение для R). Скорость вихря Россби превышает величину v_Φ . Соответственно в формуле для r_0 следует произвести замену $g \rightarrow g/\cos \alpha_0$.

Для возбуждения вихря Россби была выбрана точка с координатами $r = 10$ см, $z = 6$ см, в которой $\cos \alpha_0 \approx 0,6$, радиус кривизны поверхности жидкости в меридианальном сечении (см. формулу (3)) $R \approx 32$ см, радиус Россби при $H_0 = 0,3$ см и $f_0 = 1,8$ Гц $r_0 \approx 1,7$ см. Вокруг этой точки вблизи дна жидкости вращался тонкий металлический диск диаметром 3 см. Диск постепенно вовлекал воду над ним и в окрестности в локальное вращение.

Опыты показали, что при вращении диска в "нужном" направлении, т.е. против глобального вращения сосуда (рис. 1), над диском возникает геострофически равновесный антициклонический вихрь — вращающееся возвышение воды, высота которого ΔH определяется (регулируемой) частотой и продолжительностью вращения диска. Типичной была амплитуда вихря $\Delta H \approx H_0$ ($h \approx 1$). Растеканию этого антициклона под действием гравитационной и центробежной силы от глобального вращения жидкости препятствует сила Кориолиса, направленная к центру вихря (центробежной силой, связанной с вращением вихря вокруг его оси, можно пренебречь). После образования локального вихря вращение диска выключалось и производилось фотографирование поверхности воды кинокамерой, расположенной над сосудом. Вода была подкрашена синей тушью, поэтому местное возвышение на фоне белого дна сосуда выглядело на фотографии темным пятном.

Опыты дали следующие результаты.

1°. Если амплитуда антициклона над вращающимся диском не слишком мала, то сразу после выключения вращения "накачки" от диска отделяется антициклонический вихрь, а над диском уровень воды опускается

до уровня окружающей жидкости. Это соответствует пункту I выводов теории.

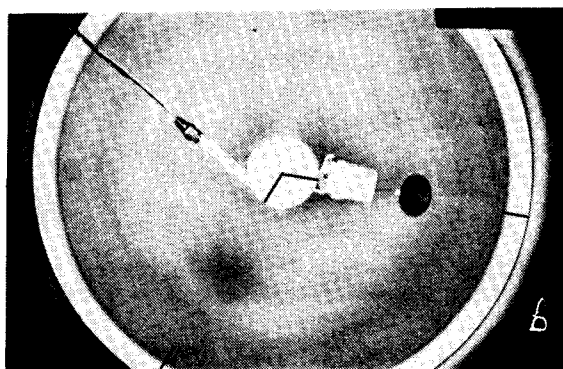
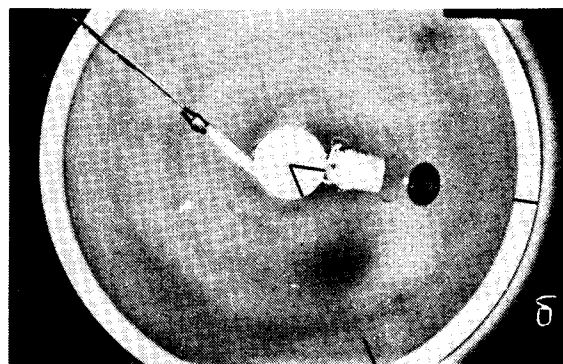
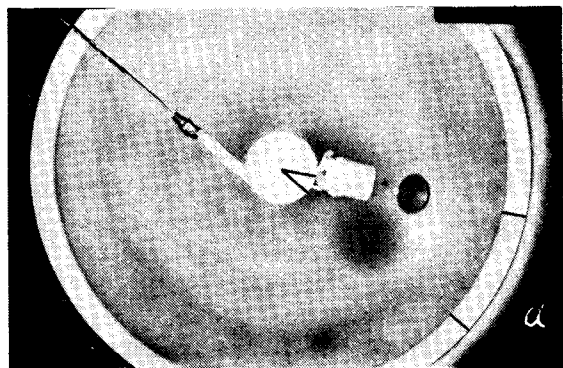


Рис.2. Фотографии поверхности вращающейся жидкости с возбужденным солитонном Россби (для наглядности угловое смещение вихря относительно диска отмечено пунктиром). Промежутки времени между экспозициями приблизительно отвечают двум оборотам сосуда ($f_0 = 1,8$ Гц)

2°. Образованный вихрь отстает от глобально вращающейся жидкости, т.е. перемещается по поверхности параболоида в сторону, обратную его вращению. Отставание вихря от создавшего его диска при $\Delta H = 0,3$ см составляет около 15° дуги за каждый оборот параболоида (рис.2). Этот факт, как нетрудно видеть, качественно и количественно неплохо соот-

ветствует пункту 2 выводов теории, поскольку скорость движения вихря в параболической модели должна несколько превышать фазовую скорость (4), которая при $\Delta H = 0,3$ см составляет около 10° за оборот.

3°. Характерный размер вихря в течение времени наблюдения остается приблизительно постоянным (рис.2) и при $H_0 = 0,3 \div 0,5$ см и $h \approx 1$ составляет $5 \div 8$ см, т.е. $3 \div 4 r_0$. Наблюдаемые размеры вихря согласуются с теоретической формулой (2) (с учетом указанной замены $g \rightarrow g/\cos \alpha_0$).

Характерное "время жизни" вихря τ (по истечении которого его высота уменьшается до неразличимого уровня) составляет 8 – 16 оборотов параболоида, т.е. $\sim 5 \div 10$ сек. Это время в сотни раз превышает время гравитационно-центробежного выравнивания возмущения и соответствует нелинейному характеру изучаемого явления. Оно приблизительно согласуется с оценкой $\tau \approx (\Delta H)^2 / \nu$, где ν – вязкость жидкости.

Важно отметить, что при вращении диска в "неправильном" направлении (совпадающем с направлением вращения сосуда) сила Кориолиса направлена от центра диска, и вместо возвышения наблюдается локальное уменьшение высоты воды. Образующаяся в этом случае "ямка" после выключения вращения диска быстро заполняется водой и исчезает за времена гравитационно-центробежного выравнивания.

Таким образом, экспериментальные результаты (1', 2', 3') находятся в согласии с выводами теории (1, 2, 3). Отметим, что при сопоставлении эксперимента с теорией необходимо помнить, что в теории относительная амплитуда вихря h считается малым параметром, тогда как на опыте $h \approx 1$. Тем не менее, нам представляется, что результаты работы позволяют сделать выводы, сформулированные в аннотации.

Авторы выражают признательность В.И.Петвиашвили за инициирование данной работы и ценные обсуждения.

Институт атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
23 февраля 1981 г.

Литература

- [1] C.G.Possby, Journ. Marine Research, 2, 38, 1939; Н.Р.GreenSPAN The Theory of Rotating Fluids, Cambridge, 1968.
- [2] А.Hasegawa, C.G.McLennan, Y.Kodama. Phys. Fluids, 22, 2122, 1979.
- [3] В.И.Петвиашвили. Физика плазмы, 3, 270, 1977.
- [4] В.И.Петвиашвили. Письма в ЖЭТФ, 32, 632, 1980.