МЕЗОМАСШТАБНЫЕ ВИХРИ В ОЗЕРАХ

Кириллин Г.Б.

*Leibniz-Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries (IGB), Müggelseedamm
310, 12587 Berlin Germany, tel. +493064181669, e-mail: kirillin@igb-berlin.de*

In lakes with horizontal dimensions less than the internal Rossby deformation radius the mesoscale coherent structures are usually a priori excluded from consideration. Eddies however seem to be a persistent feature of lake dynamics, and represent by this an insightful analogy to oceanic flows. Their importance on lake-wide scales remains unknown.

Горизонтальные масштабы большинства озер не превышают нескольких километров, что обычно меньше чем их характерный бароклиный радиус Россби. Таким образом, в отсутствие заметного влияния вращения земли на движение воды, озера считаются свободными от мезомасштабных вращающихся структур. Подробные наблюдения за динамикой озер на суб-синоптических временных масштабах стали проводиться сравнительно недавно и продемонстрировали наличие долгоживущих вихревых структур, близких по характеристикам к атмосферным и океанским синоптическим вихрям. В данной работе обсуждаются характеристики озерных вихрей и возможные пути их генерации.

Первые детальные наблюдения озерных мезомасштабных вихрей были предприняты в озере Stechlin (Германия) с помощью подповерхностных дрейфтеров (поплавков нейтральной плавучести) в 2004–2005 гг. [1]. Вихри были неоднократно прослежены в условиях, предполагающих отсутствие заметного влияния силы Кориолиса, при отношении бароклиного радиуса Россби к характерному горизонтальному масштабу около 3:1. В кинематических свойствах вихрей завихренность преобладала над прочими компонентами лагранжевого движения – дивергенцией, сдвигом и растяжением – демонстрируя близкий к твердотельному характер вращения с угловыми скоростями 3 оборота в день. Центроид вихря мог оставаться на месте, но чаще дрейфовал со скоростью около 300 м/день под влиянием преобладающей циркуляции. Из многих возможных механизмов генерации таких вихрей наиболее вероятным представляется взаимодействие с неоднородностями дна сейшевых колебаний, на которых аккумулируется большая часть

Рис. 1. Озеро Штехлин и траектория одного из наблюдаемых в нем вихрей: (А) Батиметрическая карта, изобаты через 10 м. (Б) Амплитуды четвертой моды собственных колебаний в условных единицах (цвет) и градиент собственных функций (стрелки), показывающий направление и относительную скорость сейшевых течений. Узловые линии сейши показаны черным. (В) Траектории отдельных дрейфтеров. (Г) Траектория поступательного движения вихря.

кинетической энергии в озерах. Данный вывод подтверждается также результатами моделирования, согласно которым вихри возникают при прохождении над резким падением дна одиночных солитонно-подобных внутренних волн (internal bores), либо при генерации сейшевых колебаний высших мод, которые имеют максимум амплитуды вблизи локализованного падения дна (рис. 1). Мультимодальный характер сейшей и неоднородная морфометрия различных озер предполагают, что это взаимодействие может принимать различные формы, будучи

типичным для большинства озер и внося значительный вклад в массообмен между литоральными (прибрежными) и пелагиальными (центральными) водами.

Особый вид циркуляции в озерах представляет собой динамика озер, покрытых льдом. Оставаясь слабо стратифицированными, озера подо льдом имеют малый бароклинный радиус Россби, так что сила Кориолиса приобретает основное значение в циркуляции, потенциально способствуя образованию стабильных вихрей. Этому также способствует отсутствие ветровых течений. Стабильный циклонический вихрь с характеристиками, близкими к мезомасштабным океанским вихрям, был описан Форрестом и др. [2] в покрытом льдом озере Pavilion (Канада). Вихрь с горизонтальными размерами около 100 м занимал верхний перемешанный слой в центре озера, без видимой связи с неоднородностями дна или повехностными/грунтовыми притоками. Механизм генерации остался невыясненным, однако важная роль силы Кориолиса в поддержании вращательного движения была очевидна (бароклинный радиус Россби ~ 200 м), и авторы провели аналогию с вихрями, наблюдаемыми под океанским льдом (см., напр., [3]). Дополненный шаг к пониманию механизмов возникновения вихрей в пресноводных озерах, покрытых льдом, был сделан в работе [4] по наблюдениям в полярном озере Kilpisjärvi (Финляндия). На поздней стадии ледового периода, прогрев воды в береговых промоинах приводит к конвергентным склоновым течениям и апвеллингу в центральной части озера. Возвратное дивергентное течение при этом уравнивается Кориолисовым ускорением и приводит к возникновению антициклонической циркуляции. Последняя, в свою очередь, интенсифицируется за счет уменьшения глубины в направлении радиальной компоненты дивергентного течения (рис. 2). Угловая скорость вихря достигала 0.33 оборота в день, что существенно для подледных озерных течений и предполагает интенсивный обмен водными массами между литоралью и пелагалью. Следовательно, образованию вихрей способствуют общие для всех подледных озер черты, такие как отсутствие ветрового перемешивания и горизонтальные неоднородности поверхностного прогрева и рельефа дна. Общность вихреобразования как характерной черты для озер покрытых льдом, подтверждают наблюдения в Байкале и др. озерах [5, 6]. Роль вихрей в озерной динамике остается предметом изучения.

Рис. 2. Схема образования антициклонического вихря при таянии прибрежного льда в озерах. Разрез: температура воды в оз. Kõljajärvil по шкале 0–4°C. Стрелки: вертикальный профиль скоростей течения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kirillin G., Englehardt C., and Golosov S. A mesoscale vortex in a small stratified lake // *Environ. Fluid Mech.* 2008. Vol. 8. P. 349–366.
2. Forrest A.L., Laval B.E., Pieters R., and Lim D. A cyclonic gyre in an ice-covered lake // *Limnol. Oceanogr.* 2013. Vol. 58. P. 363–375.
3. Timmermans M.-L., Toole J., Proshutinsky A., Krishfield R., and Plueddemann A. Eddies in the Canada Basin, Arctic Ocean, observed from ice-tethered profilers // *J. Phys. Ocean.* 2008. Vol. 38. P. 133–145.
4. Kirillin G.B., Forrest A.L., Graves K.E., Fischer A., Engelhardt C., and Laval B.E. Axisymmetric circulation driven by marginal heating in ice-covered lakes // *Geophys. Res. Lett.* 2015. Vol. 42. P. 2893–2900.
5. Granin N.G., Kozlov V.V., Tsvetova E.A., and Gnatovsky R.Y. Field studies and some results of numerical modeling of a ring structure on Baikal ice // *Doklady Earth Sciences* 2015. Vol. 461. P. 316–320.
6. Kouraev A.V., Zakharova E.A., Rémy F., Kostianoy A.G., Shimaraev M.N., Hall N.M., & Suknev A.Y. Giant ice rings on lakes Baikal and Hovsgol: Inventory, associated water structure and potential formation mechanism // *Limnol. Oceanogr.* 2016. Vol. 61. P. 1001–1014.