ЛЕДОВЫЕ КОЛЬЦА БАЙКАЛА: НАБЛЮДЕНИЯ, ГИПОТЕЗЫ, ТЕОРИЯ

Зырянов В.Н.¹, Кураев А.В.^{2,3}, Костяной А.Г.⁴

¹Институт водных проблем РАН

²LEGOS, Université de Toulouse, CNES, CNRS, IRD, UPS Toulouse, France

³Томский государственный университет

*⁴Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, 117997, г. Москва,
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: e-mai: v.n.zyryanov@yandex.ru,
kouraev@legos.obs-mip.fr, kostianoy@gmail.com*

The phenomenon of ice rings in Baikal is discussed. It was shown that melting of the ice cover from the bottom side in the form of a ring is due to the formation of the Stuartson's layer on the lateral surface of the geostrophic eddy and, as a result, generation of the divergent ring vortex in the Ekman layer under the ice.

В 2009 г. по спутниковым снимкам впервые были обнаружены на льду Байкала гигантские кольца в ледовом покрове [1]. И в последующие годы такие кольца регулярно фиксировались на спутниковых снимках на льду Байкала. Внимательное изучение космических снимков за предыдущие годы показало, что кольца на снимках появлялись даже раньше, начиная с 1970-х гг. [2]. Причем аналогичные кольца были зафиксированы также в разные годы (начиная с 1975) на озере Хубсугул в Монголии [2]. Кольца имеют практически круглую форму в диаметре 5–7 км с шириной самого кольца более темного и более тонкого льда порядка 1 км. Конечно, образования таких гигантских размеров можно было увидеть только со спутников. По кольцу лед тонкий, может составлять 20–30 см и менее, и представляет опасность для людей и машин, а внутри кольца и вне его лед толстый до метра толщины и белый (рис. 1).

Подледные гидрологические измерения течений и термической структуры вод в районе колец показали [2], что в геострофической области озера под кольцом сидит антициклонический вихрь, который и доставляет более теплую глубинную воду к нижней поверхности льда, что и приводит к вытаиванию льда снизу (рис. 1). Но вопрос, почему же лед вытаивается снизу по кольцу, остается открытым. В данной работе предлагается теория этого феномена.

Рис. 1. Кольцо во льду Байкала (Слюдянка, 25.04. 2009) [2], (слева); вертикальное распределение температуры в водной толще под кольцом (Байкал, м. Нижнее Изголовье, 2012, апрель) [2], (справа).

Постановка задачи

Таяние льда по кольцу происходит в слое Экмана, примыкающего к нижней поверхности льда. Рассмотрим антициклонический геострофический вихрь и слой Экмана над ним у льда (рис. 2). Тогда в цилиндрических координатах (рис. 2) для радиальной скорости течения $v_r(r, z)$ и азимутальной $v_\phi(r, z)$ в слое Экмана будем иметь выражения:

$$v_r(r, z) = v_\phi^{(g)}(r) \exp(-\alpha z) \sin(\alpha z)$$

$$v_\phi(r, z) = -v_\phi^{(g)}(r) [1 - \exp(-\alpha z) \cos(\alpha z)] \quad 1)$$

где $v_\phi^{(g)}(r)$ – азимутальная скорость в геострофическом вихре, $\alpha = \sqrt{f/2E_v}$ – безразмерный параметр Кориолиса, $E_v = f_0 / A_z H_0^2$ – вертикальное число Экмана, A_z – коэффициент вертикального турбулентного обмена импульсом. В компоненты скорости движения в слое Экмана (1) радиальная скорость в геострофическом вихре не входит, так как она равна нулю.

Будем рассматривать однородную по плотности жидкость. Зададим структуру антициклонического геострофического вихря в виде топографического вихря [3, 4]. На самом деле, как показали наблюдения над местами появления колец на Байкале, кольца, как правило, появляются в углах каньонов, и пока гидродинамика их образования не совсем ясна. Оставляя пока на данный момент в стороне причины образования геострофических вихрей, сосредоточимся на динамике течений в слое

Экмана. Будем считать, что кинематика геострофических вихрей в Байкале аналогична кинематике топографических вихрей. Заметим, что те и другие одного типа – антициклонические.

Рис. 2. К постановке задачи: 1 – геострофический антициклонический вихрь, 2 – круговой цилиндрический слой Стьюарта, 3 – подледный слой Экмана, 4 – дно, 5 – лед.

Для азимутальной скорости $v_\phi^{(g)}(r)$ в геострофическом вихре радиуса $R = 1$ будем иметь выражение [3, 4]:

$$v_\phi^{(g)}(r) = -\tilde{\sigma} \begin{cases} K_1(\sigma)I_1(\sigma r), & r \leq 1; \\ I_1(\sigma)K_1(\sigma r), & r > 1. \end{cases} \quad (2)$$

где $\tilde{\sigma}$ – интенсивность вихря, $\sigma = \sqrt{b/U_0}$, $b = \beta L^2/U_0$ – планетарный параметр, β – бета-эффект, L – размерный радиус вихря, U_0 – характерная скорость течения, K_1, I_1 – Бесселевы функции мнимого аргумента 1-го порядка.

Для вертикальной скорости $w(r, z)$ имеем выражение из уравнения неразрывности в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial w(r, z)}{\partial z} = -\frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{\partial v_\phi}{r \partial \phi} - \frac{v_r}{r}. \quad (3)$$

Принимая во внимание, что в силу радиальной симметрии $\partial v_\phi / r \partial \phi = 0$, будем иметь из (3)

$$\frac{\partial w(r, z)}{\partial z} = -\frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r}. \quad (4)$$

Подставляя $v_r(r, z)$ из (1) в (4) и интегрируя по z от нижней границы льда $z = 0$ до горизонта z , получим

$$w(r, z) = -\sqrt{\frac{E_v}{2f}} \left(\frac{dv_\phi^{(g)}}{dr} + \frac{v_\phi^{(g)}}{r} \right) \left[1 - \sqrt{2} \exp(-\alpha z) \sin\left(\alpha z + \frac{\pi}{4}\right) \right]. \quad (5)$$

Из (2) следует, что

$$\frac{dv_\phi^{(g)}}{dr} + \frac{v_\phi^{(g)}}{r} = -\tilde{\sigma} \begin{cases} K_1(\sigma) \left[\sigma \frac{I_0(\sigma r) + I_2(\sigma r)}{2} + \frac{I_1(\sigma r)}{r} \right], & r \leq 1; \\ I_1(\sigma) \left[-\sigma \frac{K_0(\sigma r) + K_2(\sigma r)}{2} + \frac{K_1(\sigma r)}{r} \right], & r > 1 \end{cases}, \quad (6)$$

где K_0, I_0 – Бесселевы функции мнимого аргумента нулевого порядка, K_2, I_2 – Бесселевы функции мнимого аргумента 2-го порядка.

Зная теперь $v_r(r, z)$, $v_\phi(r, z)$ и $w(r, z)$, можно вычислить трехмерную структуру течения в подледном пограничном слое Экмана, генерируемую геострофическим вихрем.

Как показали расчеты, по внутренней стороне слоя Стьюартсона идет подъем теплых глубинных вод в слой Экмана. Наиболее интенсивные горизонтальные и вертикальные движения воды происходят в экмановском слое в зоне пересечения этих слоев.

Основной вывод – вытаивание льда снизу в виде кольца обусловлено формированием слоя Стьюартсона на боковой поверхности геострофического вихря и генерации им кольцевого дивергентного вихря в слое Экмана подо льдом.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Грант 16-05-00209, ИБП РАН, Зырянов В.Н.); грантов (Кураев А.В.) – ERA.NET RUS Plus S&T #226 “ERALECC”, CNES TOSCA «LakeIce», CNRS PICS «BaLaLaICA», Toulouse Arctic Initiative, RFBR 13-05-91051, GDRI «Car-Wet-Sib», RFBR-RGO 17-05-41043-RGO-a, IDEX InHERA; темы Госбюджета № 149-2018-0003 (ИО РАН, Костяной А.Г.) «Механизмы формирования циркуляционных структур Мирового океана: ключевые процессы в пограничных слоях и их роль в динамике океана на основе экспедиционных исследований, дистанционного зондирования, численного и лабораторного моделирования».

ЛИТЕРАТУРА

1. Granin N.G. The ringed Baikal // Science from First Hands. 2009. Vol. 3. P. 22–23 (in Russian).
2. Kouraev A.V., Zakharova E.A., Rémy F., Kostianoy A.G., Shimaraev M.N., Hall N.M.J., and Suknev A.Ya. Giant ice rings on Lakes Baikal and Hovsgol: inventory, associated water structure and potential formation mechanism // Limnology and Oceanography. 2016. Vol. 61. P. 1001–1014. DOI: 10.1002/lno.10268.
3. McCartney M.S. Inertial Taylor columns on a beta-plane // J. Fluid Mech. 1975. Vol. 68. No. 1. P. 71–96.
4. Zyryanov V.N. The Steady Ocean Current Theory. St-Petersburg: Gidrometeoizdat, 1985. 248 p. (in Russian).