

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

УДК 551.467

КАНЬОННЫЕ ВИХРИ. ПРИЛОЖЕНИЕ ТЕОРИИ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ К ФЕНОМЕНУ ЛЕДОВЫХ КОЛЕЦ БАЙКАЛА¹

© 2022 г. **В. Н. Зырянов^а**, **М. К. Чебанова^а**, **Д. В. Зырянов^а***

^аИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

*e-mail: denis.zuryanov@gmail.com

Поступила в редакцию 13.10.2021 г.

После доработки 13.10.2021 г.

Принята к публикации 22.10.2021 г.

Рассмотрен феномен ледовых колец на оз. Байкал. Предложена гидродинамическая теория, согласно которой в районе наблюдаемых ледовых колец подо льдом образуются геострофические вихри, обусловленные рельефом дна, а именно – подводными каньонами, – каньонные вихри. Показано, что в кольцевой области пересечения вертикального цилиндрического слоя Стьюартсона на боковой поверхности каньонного геострофического вихря и подледного горизонтального слоя Экмана формируется дивергентный кольцевой вихрь подо льдом в виде горизонтального вихревого тора и вытаивание льда снизу в виде кольца обусловлено именно формированием этого вихревого тора.

Ключевые слова: ледовые кольца, Байкал, каньонный геострофический вихрь, слой Стьюартсона, слой Экмана.

DOI: 10.31857/S0321059622020195

На льду Байкала по спутниковым снимкам в 2009 г. впервые обнаружены гигантские кольца в ледовом покрове [2–4, 9, 11–14]. И в последующие годы такие кольца регулярно фиксировались на спутниковых снимках. Внимательное изучение космических снимков за предыдущие годы показало, что кольца фиксировались даже раньше, с 1970-х гг. [13]. Причем аналогичные кольца были зафиксированы также в разные годы с 1975 г. на оз. Хубсугул в Монголии и на оз. Телецком на Алтае [13, 14]. Кольца имеют практически круглую форму, диаметр 5–7 км, ширина кольца более темного и более тонкого льда ~1 км. Конечно, образования таких гигантских размеров можно было увидеть только на спутниковых снимках достаточно высокого разрешения. По кольцу лед тонкий, его толщина может составлять 20–30 см и менее и представляет опасность для людей и машин, а внутри кольца и вне него лед белый и толстый толщиной до 1 м (рис. 1).

Предлагаемые в литературе объяснения возникновения ледовых колец весьма разнообразны: от воздействия атмосферы и биологических процессов в верхнем слое воды до проявления НЛО, т. е. до откровенных уфологических мистификаций, как, к примеру, круги на полях и т. д. Наиболее

обсуждаемая в последнее время гипотеза – гидротермальная активность оз. Байкал, связанная с чрезвычайно высокой интенсивностью выхода газов (метана) из донных отложений в некоторых местах озера [2–4, 7, 11, 12]. На мелководье метан обычно попадает в толщу воды благодаря его локальным выходам и грязевым вулканам в местах разломов на дне, создавая пропарины (небольшие участки открытой воды размером от нескольких метров до нескольких десятков метров) в ледовом покрове и так называемые сопки. На больших глубинах метан может выделяться в основном из газогидратов, которые находятся на глубинах >500 м в южной и центральной котловинах оз. Байкал [8].

Как именно кольца могут образоваться после выхода газов, до сих пор не очень понятно. По одной из гипотез [2, 3], основанной на данных натурных наблюдений в апреле–мае 2009 г. со льда в районе кольца в южной части оз. Байкал у пос. Слюдянка (рис. 1б) и на численном моделировании, локальный подъем глубинных вод после выброса газа из точечного источника приводит к образованию под воздействием силы Кориолиса куполообразной структуры поля плотности воды и к появлению антициклонического (направленного по часовой стрелке) геострофического кольцевого течения. Однако у этой гипотезы есть слабые стороны. Одна из них связана с законом расширения вертикальной струи, поднимающейся

¹ Работа выполнена в рамках исследовательского проекта 0147-2019-0001 (государственная регистрация АААА-А18-118022090056-0) при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 19-05-00522а).

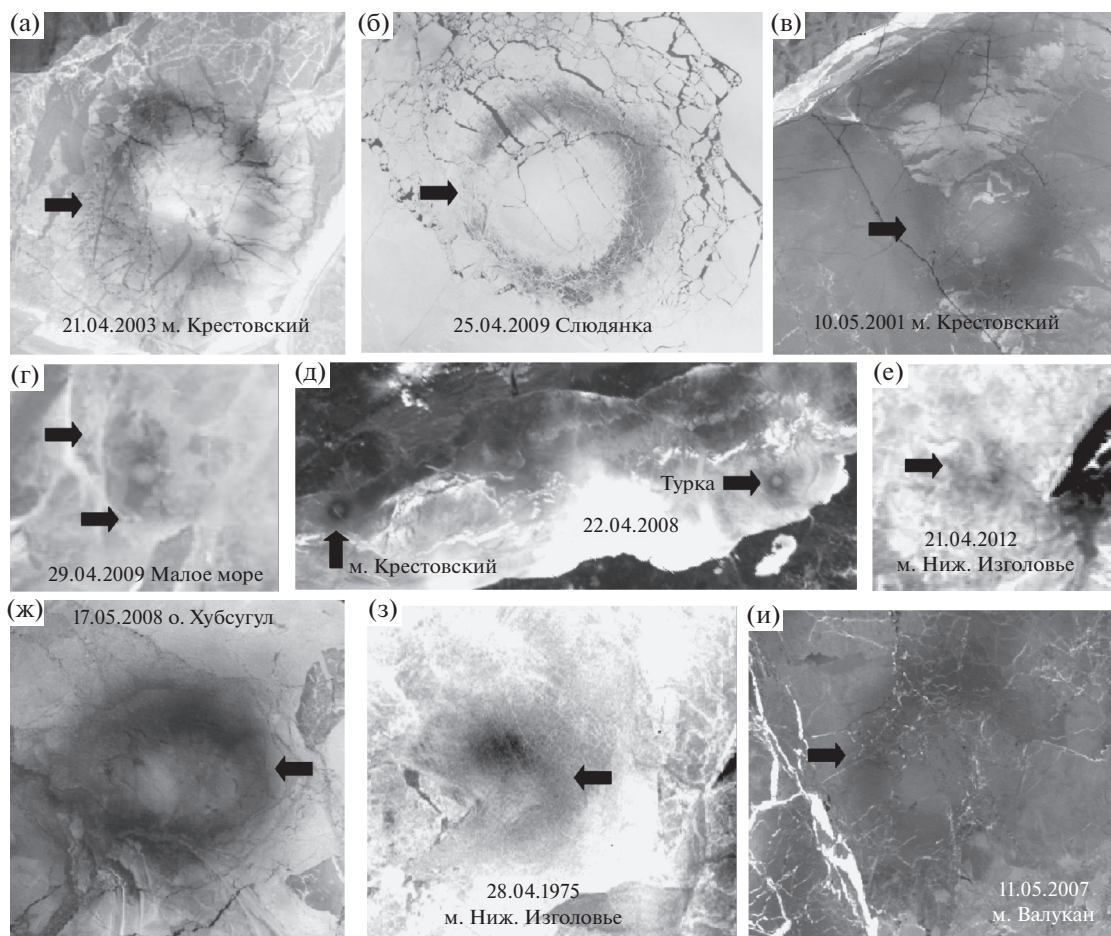


Рис. 1. Ледовые кольца на озерах Байкал и Хубсугул. Данные Landsat 1–7 (а, в, ж–и), MODIS/Terra (г–е) и МКС (б). Все изображения, за исключением (е), ориентированы на С (из [13]).

со дна. Д. Фоксом дано решение задачи о вертикальной струе в устойчиво стратифицированной жидкости без внешнего течения [16]. Из этой теории следует, что максимальный угол конуса расширения струи при ее подъеме составляет 43° . По экспериментам получается несколько меньший угол, и зависимость диаметра струи d на расстоянии z от точки истечения жидкости дается зависимостью $d = 0.68z$. Если учесть, что глубина Байкала в районе кольца у пос. Слюдянка составляет 750 м, то получается, что диаметр кольца на поверхности не может быть >550 м, т. е. 4 км в диаметре никак не получится.

Другие гипотезы, связанные с выходами газа, включают в себя учет формирования тороидальной конвекции из-за подъема газа, приносящей к поверхности более теплую воду [7], или формирования гигантского газового пузыря под ледовым покровом, который изолирует центральную часть и в то же время увеличивает теплообмен на внешней границе [11, 12]. Авторы [1] считают, что образование ледовых колец объясняется деформациями и неоднородностью ледового покрова и

самоорганизацией в процессе разрушения льда в виде кольцеобразной структуры под воздействием приходящей солнечной энергии.

В работе [13] представлены архивы спутниковых снимков и фотографий, полный перечень наблюдаемых ледовых колец, а также их параметры. Проведенные полевые гидрологические исследования (2010–2015 и 2019 гг.) показали, что в геострофической области озера под кольцом находится антициклонический вихрь. Этот вихрь приносит более теплую глубинную воду к нижней поверхности льда, что и приводит к вытаиванию льда снизу. Подо льдом в поле температуры образуется линзовидная область перемешанной воды (рис. 2) [14]. Это навело авторов работ [13–15] на мысль, что антициклонический вихрь под кольцом есть не что иное, как внутритермоклинная линза. Но в этой гипотезе много существенных нестыкочков.

Первое труднообъяснимое наблюдение – это поле скоростей в вихре. Следуя работе [10], на которую ссылаются авторы указанных работ, вектор

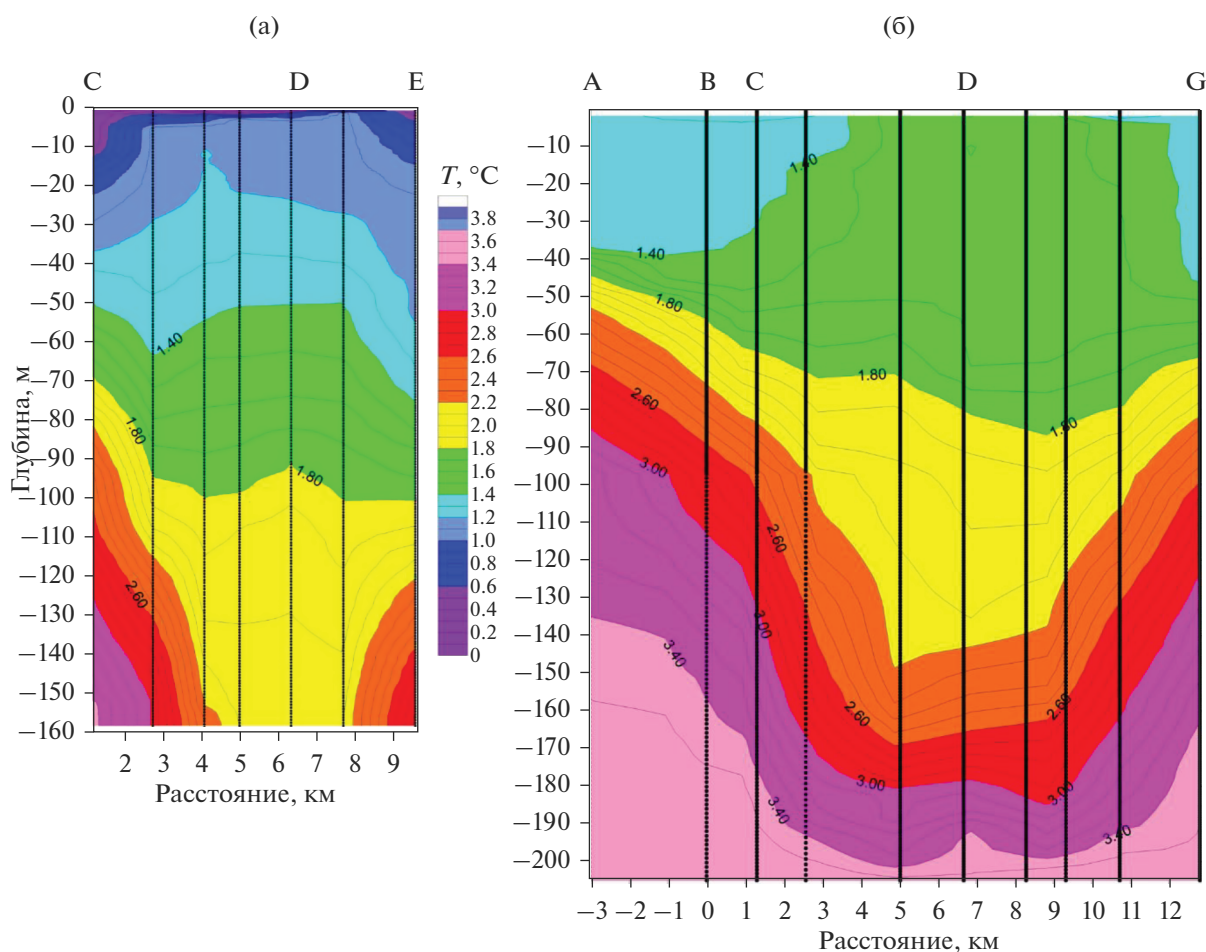


Рис. 2. Вертикальное распределение температуры в водной толще под кольцом в феврале (а) и марте (б) 2016 г. (Байкал, м. Нижнее Изголовье). Вертикальные линии показывают расположение станций [14].

скорости в области непосредственно под кольцом должен быть сначала направлен под некоторым углом к касательной, но внутрь кольца, затем ниже, наоборот, — наружу кольца, а еще ниже — снова внутрь кольца. Ничего похожего по данным измерений нет (рис. 3), вектор скорости всегда направлен наружу кольца, т. е. жидкость разносится вихрем из кольца наружу; таким образом, вихрь имеет дивергентный характер.

Вторая проблема, связанная с линзой, — это ее постоянное местоположение под кольцом. Хорошо известно, что линза не может стоять на месте, у нее есть бета-дрейф, т. е. она должна двигаться. А в случае ледовых колец линза располагается подо льдом в одном и том же месте месяцами. Аргумент в пользу того, что линза захватывается рельефом дна, тоже не выдерживает критики. Последнее возможно, если под линзой формируется компенсационный вихрь в нижнем слое до дна, т. е. образуется хетон. Но тогда нижний вихрь в этом случае всегда представляет собой циклон и

подъем глубинных вод в районе кольца ничем не объясняется.

Надо отметить, что впервые такая линзовидная структура в поле температуры была обнаружена Н.Г. Граниным с соавторами [4] в апреле 2009 г. под кольцом в районе Слюдянки (рис. 16) в южной части оз. Байкал. Последующие измерения, в том числе в феврале 2019 г. под кольцом у м. Нижнее Изголовье (рис. 2), еще раз подтвердили такую структуру под кольцом в поле температуры. Но, пожалуй, самое непонятное в гипотезе о внутритермоклинной линзе — то, что она не раскрывает причины таяния льда по кольцу. Если вихрь имеет форму линзы, то его кинематика следующая: вода поднимается по верхней поверхности линзы к ее центру, а это значит, что лед должен в первую очередь таять в центре, т. е. должна образовываться полынья. Необходимо отметить, что на таяние льда снизу большое влияние оказывают скорости подледных течений в слое конвективного перемешивания — чем больше скорости течения, тем быстрее тает лед. Эту идею можно

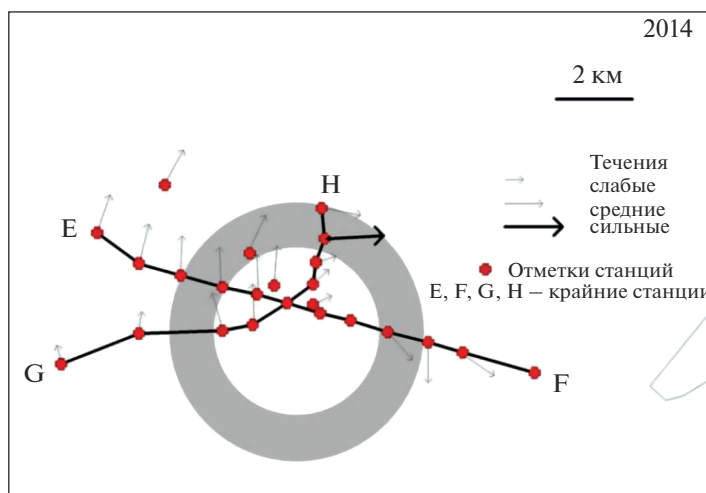


Рис. 3. Измеренные скорости течений подо льдом по разрезам через зону ледового кольца вблизи м. Нижнее Изголовье (Байкал, 3 апреля 2014 г.) [13].

было бы применить к линзе, но в таком случае максимум скоростей течения будет располагаться на глубине 40–50 м, что довольно далеко от поверхности льда. Из вышесказанного следует, что линзы здесь вряд ли могут быть.

Таким образом, на главный вопрос: почему же лед тает снизу вдоль кольца, — не может дать ответ ни одна из имеющихся гипотез об образовании ледовых колец. В данной работе предлагается альтернативная теория этого феномена.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Если внимательно посмотреть на карту рельефа дна Байкала с обозначенными на ней местами появления колец, то обнаруживается интересное совпадение — кольца, как правило, располагаются в углах подводных каньонов на дне озера [13]. Обнаруженные кольца на оз. Хубсугул в Монголии также находятся в начале/конце подводных каньонов. Тот факт, что вихри под кольцами находятся месяцами на одном и том же месте, свидетельствует о том, что их удерживает рельеф дна, т. е. они напрямую привязаны к батиметрии. Эти факты указывают на главный фактор образования стационарных антициклонических вихрей под кольцами — воздействие рельефа дна, а именно — угловых областей подводных каньонов. Все исследователи ледовых колец по непонятной причине не принимают во внимание основополагающий фактор в геофизической гидродинамике — архитектура устойчивых мезо- и крупномасштабных течений определяется рельефом дна. Местоположения колец надо всегда накладывать на батиметрическую карту.

Физика образования каньонных вихрей следующая — крупномасштабные движения вод в гео-

строфической области озера происходят преимущественно вдоль изолиний функции f/H (f — параметр Кориолиса, H — глубина водоема). В силу малой изменчивости f можно считать, что вдоль изобат крупномасштабные движения вод в котловинах Байкала имеют циклонический характер, т. е. вода движется против часовой стрелки. Рассмотрим столб жидкости между двумя изобатами на подходе к угловой точке каньона. Для определенности будем считать, что каньон расположен на севере котловины, как, к примеру, каньон у м. Нижнее Изголовье. При подходе к седловой точке перевала глубин расстояние между изобатами увеличивается, так как рельеф дна начинает уплощаться. На рис. 4 показаны два типа подводных каньонов Байкала. Тип (а) соответствует району м. Нижнее Изголовье, где возникает ледовое кольцо, тип (б) соответствует району южного Байкала в районе пос. Слюдянка, где также возникает ледовое кольцо.

В первоначальном состоянии столб жидкости A вращался с угловой скоростью вращения Земли на данной широте, поэтому его момент количества движения L_z в инерциальной системе координат относительно вертикальной оси будет равен $L_z = L_z \omega$ (L_z — момент инерции столба жидкости, ω — угловая скорость вращения столба жидкости, в данном случае проекция на вертикаль к зеркалу озера угловой скорости вращения Земли). Момент инерции цилиндра радиуса R равен $J_z = mR^2/2$. С течением столб жидкости A переместится в положение B (рис. 4а, 4б). Так как изобаты расходятся при приближении к угловой точке каньона, то R будет увеличиваться, и, следовательно, L_z тоже. Но момент количества движения (импульса) должен сохраняться. Следова-

тельно, в угловой точке каньона скорость вращения столба должна замедлиться, а это означает, что в системе координат, жестко связанной с Землей, столб жидкости закрутится антициклонически. Таким образом, рассмотренная ситуация аналогична образованию топографических вихрей над подводными горами. Можно также вычислить эквивалентную “псевдо-гору”, которая будет генерировать точно такую же завихренность.

Рассмотрим эту ситуацию более подробно. Как видно из рис. 4, первоначально круговой столб жидкости *A* займет положение *B* и его горизонтальное сечение примет форму эллипса. Обозначим большую полуось эллипса через R_2 , малую полуось – через R_3 , а первоначальное значение радиуса цилиндра *A* – через $R_1 = R$. Тогда из равенства объемов столбов *A* и *B*, а следовательно – площадей их сечений, получим $R_3 = R_1^2/R_2$. Момент инерции эллиптического цилиндра *B* относительно вертикальной оси равен $J_z = m(R_2^2 + R_3^2)/4$. Из закона сохранения импульса имеем

$$\frac{m}{4} \left(R_2^2 + \frac{R_1^4}{R_2^2} \right) \omega_2 = \frac{m}{2} R_1^2 \omega. \quad (1a)$$

Введем обозначение $\Delta\omega = \omega_2 - \omega$. Это та дополнительная завихренность, которая будет проявляться в действительности (которую будем наблюдать). Из (1a) получим

$$\Delta\omega = -\frac{(R_2^2 - R_1^2)^2}{R_1^4 + R_2^4} \omega = -\bar{R}\omega. \quad (2a)$$

Из (2a) видно, что столб жидкости *B* приобретет отрицательную завихренность, т. е. начнет вращаться антициклонически. Заметим, что в (2a) всегда $\bar{R} < 1$.

Вычислим эквивалентную псевдо-гору, которая даст точно такую же завихренность. Имеем $\omega = \omega_E \sin\phi$, ω_E – угловая скорость вращения Земли, ϕ – широта места. Следовательно, $\omega = f/2$ (f – параметр Кориолиса), и тогда (2a) можно записать в виде $\Delta\omega = -\bar{R}f/2$. При натекании потока на подводную гору высотой h поток приобретает антициклоническую завихренность, равную $\Delta\omega = -fh/H$ (H – глубина водоема) [5]. Приравнявая два полученных выражения для $\Delta\omega$, получим высоту эквивалентной псевдо-горы, порождающей точно такой же вихрь:

$$h = \bar{R}H/2. \quad (3a)$$

Теперь можно использовать хорошо развитую теорию топографических вихрей [5], чтобы полу-

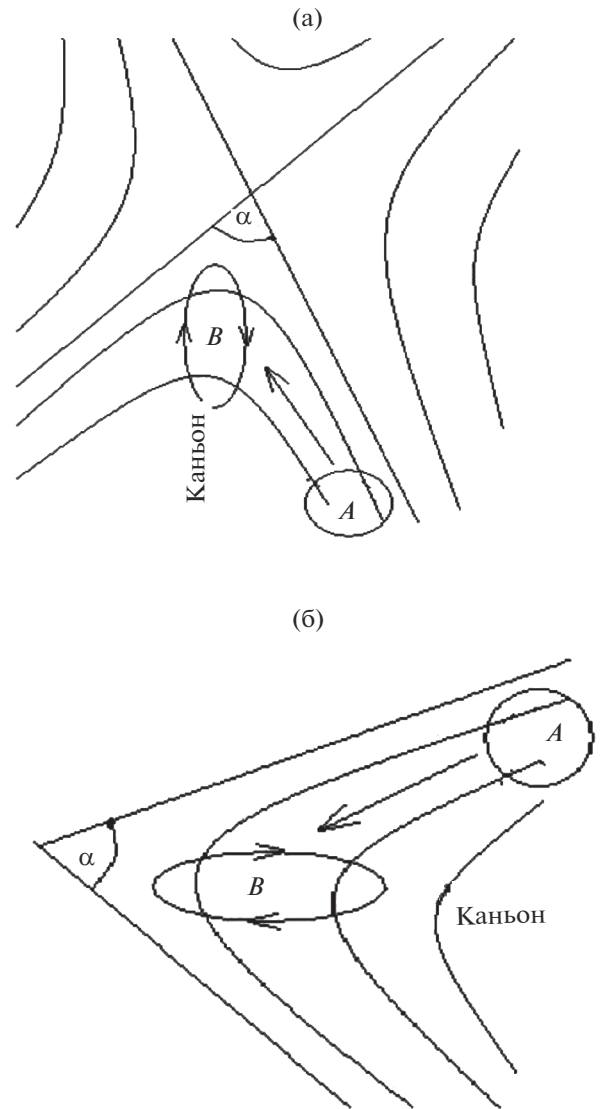


Рис. 4. Схематическое изображение двух типов подводных каньонов: а – подводный каньон в седловой точке рельефа дна; б – каньон в угловой области береговой линии (залив).

чить кинематику движения вод в подледной области под кольцом.

Таяние льда происходит в подледном слое, примыкающем к нижней поверхности льда. Во вращающейся жидкости это слой трения Экмана, поэтому гидродинамику под кольцом надо рассматривать именно в слое Экмана. Ясно, что само по себе вихревое движение в слое Экмана подо льдом возникнуть не может, его будет инициировать вихревое движение в геострофической области, т. е. каньонный вихрь.

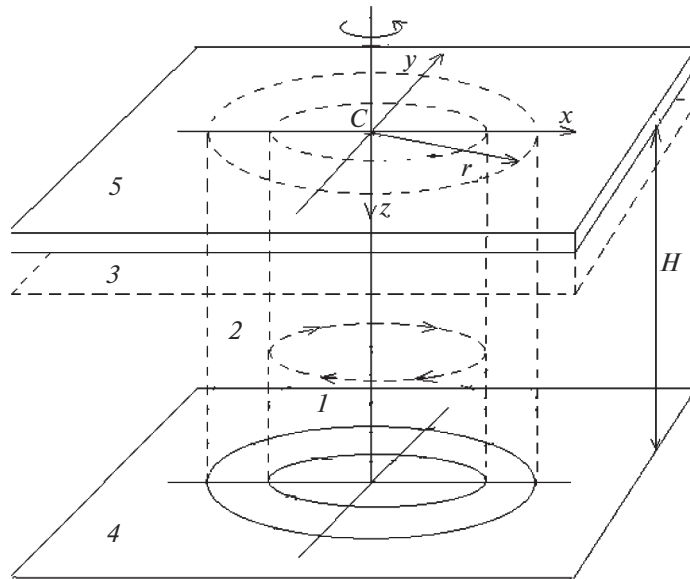


Рис. 5. К постановке задачи: 1 – геострофический антициклонический вихрь; 2 – круговой цилиндрический слой Стюарта, 3 – подледный слой Экмана, 4 – дно, 5 – лед.

ПОДЛЕДНЫЙ СЛОЙ ЭКМАНА

Рассмотрим антициклонический геострофический вихрь и слой Экмана над ним у льда (рис. 5). В слое Экмана для безразмерной комплексной горизонтальной скорости $U(x, y, z)$ течения будем иметь следующее выражение [5]:

$$U = u + iv = -\frac{g}{if} \left(\frac{\partial P_g}{\partial x} + i \frac{\partial P_g}{\partial y} \right) + C_1 \exp\left(\sqrt{\frac{fi}{E_v}} z\right) + C_2 \exp\left(-\sqrt{\frac{fi}{E_v}} z\right), \quad (1)$$

где i – мнимая единица; f – безразмерный параметр Кориолиса; $E_v = A_z / f_0 H_0^2$ – вертикальное число Экмана; A_z – коэффициент вертикального турбулентного обмена импульсом; g – ускорение свободного падения; P_g – геострофическая составляющая давления; C_1, C_2 – неизвестные константы; H_0 – глубина; z – безразмерная вертикальная координата.

Учитывая условие прилипания на нижней границе льда и ограниченность скорости на бесконечности

$$U|_{z=0} = 0, \quad U|_{z \rightarrow +\infty} < C < \infty, \quad (2)$$

получим

$$C_1 = 0, \quad C_2 = \frac{g}{if} \left(\frac{\partial P_g}{\partial x} + i \frac{\partial P_g}{\partial y} \right) \Big|_{z=0}. \quad (3)$$

Будем рассматривать однородную жидкость. Тогда градиент от P_g не зависит от z , и будем иметь для скорости $U(x, y, z)$ в экмановском слое выражение:

$$U = u + iv = -\frac{g}{if} \left(\frac{\partial P_g}{\partial x} + i \frac{\partial P_g}{\partial y} \right) \left[1 - \exp\left(-\sqrt{\frac{fi}{E_v}} z\right) \right]. \quad (4)$$

Перепишем выражение (4) для $U(r, \varphi, z)$ в цилиндрических координатах:

$$U = v_r + iv_\varphi = -\frac{g}{if} \left(\frac{\partial P_g}{\partial r} + i \frac{\partial P_g}{r \partial \varphi} \right) \times \left[1 - \exp\left(-\sqrt{\frac{fi}{E_v}} z\right) \right], \quad (5)$$

где $v_r(r, z)$ и $v_\varphi(r, z)$ – соответственно радиальная и азимутальная составляющие скорости. Из осесимметричности геострофического вихря следует $\frac{\delta P_g}{r \delta \varphi} = 0$. В силу геострофики имеем

$$v_\varphi^{(g)} = -\frac{g}{f} \frac{\partial P_g}{\partial r}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5) и разделяя действительную и мнимую части выражения, получим для радиальной и азимутальной составляющих скорости в слое Экмана окончательные выражения:

$$\begin{aligned} v_r(r, z) &= v_\varphi^{(g)}(r) \exp(-\alpha z) \sin(\alpha z), \\ v_\varphi(r, z) &= -v_\varphi^{(g)}(r) [1 - \exp(-\alpha z) \cos(\alpha z)], \end{aligned} \quad (7)$$

где $v_{\phi}^{(g)}(r)$ – азимутальная скорость в геострофическом вихре, $\alpha = \sqrt{f/2E_v}$. В выражения для скорости движения в слое Экмана (8) входит только азимутальная скорость в геострофическом вихре.

Учитывая приведенную выше аналогию образования каньонного и топографического вихря, зададим структуру геострофического вихря как топографического [5, 15].

Для азимутальной скорости $v_{\phi}^{(g)}(r)$ в геострофическом вихре радиуса $R = 1$ будем иметь следующее выражение [5, 15]:

$$v_{\phi}^{(g)}(r) = -\tilde{\sigma} \begin{cases} K_1(\sigma)I_1(\sigma r), & r \leq 1 \\ I_1(\sigma)K_1(\sigma r), & r > 1. \end{cases} \quad (8)$$

где $\tilde{\sigma}$ – интенсивность вихря; $\sigma = \sqrt{b/U_0}$, $b = \beta L^2/U_0$ – планетарный параметр; β – параметр Россби, характеризующий бета-эффект; L – размерный радиус вихря; U_0 – характерная скорость течения; K_1 , I_1 – модифицированные функции Бесселя (Бесселевы функции мнимого аргумента) первого порядка.

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

$$\frac{\partial w(r, z)}{\partial z} = -\frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{\partial v_{\phi}}{r \partial \phi} - \frac{v_r}{r}. \quad (9)$$

Принимая во внимание, что в силу радиальной симметрии $\delta v_{\phi}/r \delta \phi = 0$, из (10) будем иметь

$$\frac{\partial w(r, z)}{\partial z} = -\frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r}. \quad (10)$$

Подставляя $v_r(r, z)$ из (8) в (11) и интегрируя по z от нижней границы льда $z = 0$ до горизонта z , получим с учетом равенства нулю вертикальной скорости на нижней поверхности льда

$$w(r, z) = -\sqrt{\frac{E_v}{2f}} \left(\frac{dv_{\phi}^{(g)}}{dr} + \frac{v_{\phi}^{(g)}}{r} \right) \times \left[1 - \sqrt{2} \exp(-\alpha z) \sin \left(\alpha z + \frac{\pi}{4} \right) \right]. \quad (11)$$

Учитывая (9), получим

$$\begin{aligned} \frac{dv_{\phi}^{(g)}}{dr} + \frac{v_{\phi}^{(g)}}{r} = & \\ = -\tilde{\sigma} \begin{cases} K_1(\sigma) \left[\sigma \frac{I_0(\sigma r) + I_2(\sigma r)}{2} + \frac{I_1(\sigma r)}{r} \right], & r \leq 1 \\ I_1(\sigma) \left[-\sigma \frac{K_0(\sigma r) + K_2(\sigma r)}{2} + \frac{K_1(\sigma r)}{r} \right], & r > 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

K_0 , I_0 и K_2 , I_2 – модифицированные функции Бесселя нулевого и второго порядка соответственно.

Полученные формулы для $v_r(r, z)$, $v_{\phi}(r, z)$ и $w(r, z)$ дают возможность вычислить трехмерную структуру течения в подледном пограничном слое Экмана, генерируемую геострофическим каньонным вихрем. На рис. 6 приведено рассчитанное поле скоростей $v_r(r, z)$, $w(r, z)$ в плоскости переменных (r, z) .

Из рис. 6 видно, что по внутренней части слоя Стьюартсона идет подъем более теплых глубинных вод в контактирующий со льдом холодный поверхностный слой Экмана. Наиболее интенсивные горизонтальные и вертикальные движения воды наблюдаются в Экмановском слое в зоне пересечения со слоем Стьюартсона (рис. 5а).

Из рис. 6, 7 видно, что в кольцевой области пересечения слоя Стьюартсона и слоя Экмана образуется дивергентный вихрь подо льдом в виде горизонтального вихревого тора, и таяние льда снизу в виде кольца обусловлено именно формированием этого вихревого тора.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как следует из изложенной теории, кольцевая структура во льду – следствие формирования дивергентного вихря в подледном слое Экмана. В подледном слое Экмана генерируется экмановский подсос, который в данном случае направлен вверх. Заметим, что на открытой воде экмановский подсос зависит от завихренности ветра и может быть направлен как вверх, так и вниз.

Таяние льда снизу в кольцевидной области обусловлено формированием вертикального кругового слоя Стьюартсона на боковой поверхности геострофического вихря и, как следствие, образованием вихревого тора в области пересечения цилиндрического слоя Стьюартсона и подледного слоя Экмана. По внутренней части слоя Стьюартсона идет подъем теплых глубинных вод в слой Экмана, которые из него разносятся во внешнюю область. Наиболее интенсивные горизонтальные и вертикальные движения воды происходят в зоне пересечения этих слоев.

Следует отметить, что непосредственно в топографических вихрях в однородной жидкости вертикальные скорости малы, и ими пренебрегают, считая движения квазидвумерными. Но экмановский подсос в подледном слое Экмана инициирует довольно существенные вертикальные движения в слое Стьюартсона. Отсюда следует, что линзовидные структуры под кольцами, скорее всего, не являются самостоятельным образованием, а формируются в результате действия дивергентного вихря в подледном слое Экмана.

Гидрологические исследования структуры воды на разрезах через кольцевые структуры в 2012, 2014 гг. и, в особенности, в феврале–марте 2019 гг.

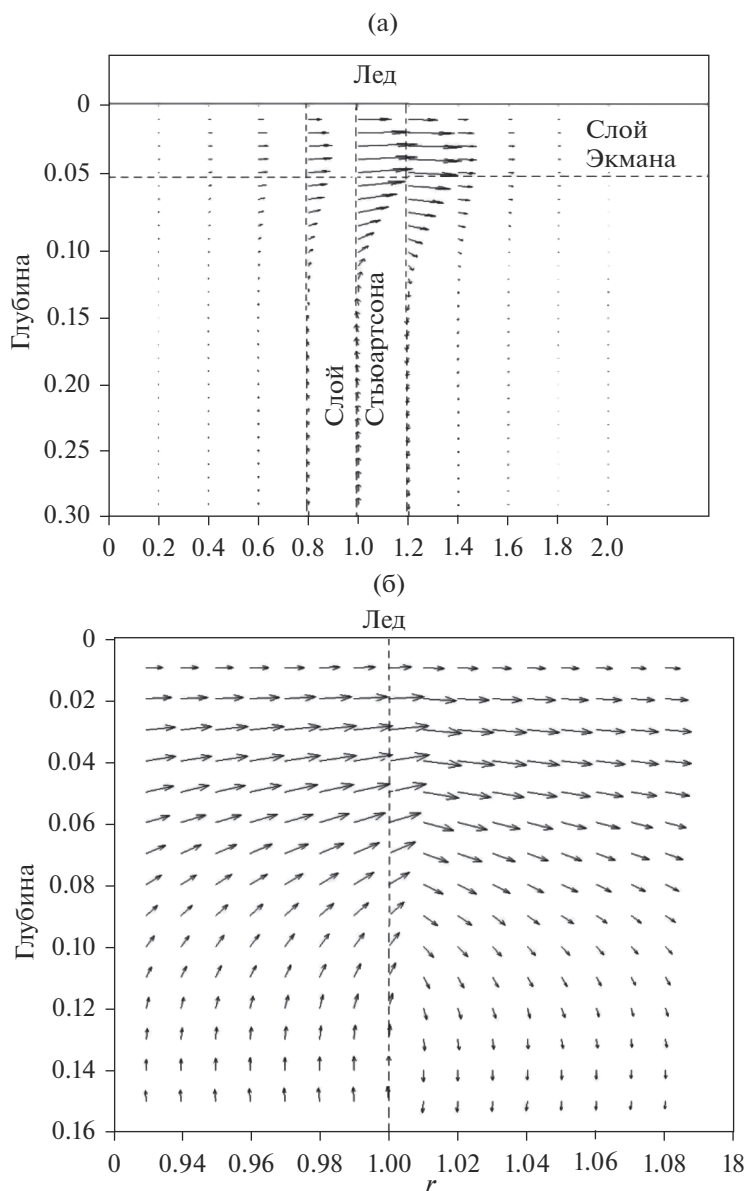


Рис. 6. а – векторное поле безразмерных скоростей $(v_r(r, z), w(r, z))$ в вертикальной плоскости; $r = 1$ – боковая граница геострофического вихря; штриховые линии – границы слоя Стьюартсона толщиной $E_h^{1/4}$ ($E_h = A_L / (f_0 L^2)$ – горизонтальное число Экмана) и подледный слой Экмана толщиной $E_v^{1/2}$; б – более детальное поле скоростей $(v_r(r, z), w(r, z))$ в вертикальной плоскости в зоне пересечения слоя Стьюартсона с подледным слоем Экмана.

показали, что линзовидные вихри под кольцами имеют изолированную круглую форму и обладают радиальной симметрией. Наблюдаемая аномальная структура воды в 2019 г. в районах ледового кольца у м. Нижнее Изголовье и измерения скоростей подледных течений указывают на то, что ледовые кольца непосредственно связаны с антициклоническим вихрем подо льдом и ледовое кольцо представляет собой поверхностное проявление подледных вихревых торов.

Отметим, что полевые исследования зимой 2019 г. в районе м. Нижнее Изголовье подтвердили линзовидную структуру воды под ледовым кольцом для поля температуры, впервые обнаруженную Н.Г. Граниным и др. в 2009 г. [3]. Температура в ядре вихря составляла 1–1.25°C. Кроме этого, авторы [3] обнаружили менее минерализованную воду подо льдом в центре кольца по сравнению с его периферийной областью в слое 0–40 м, но интересно, что ниже увеличение минерализации не наблюдалось. Сделано предположение,

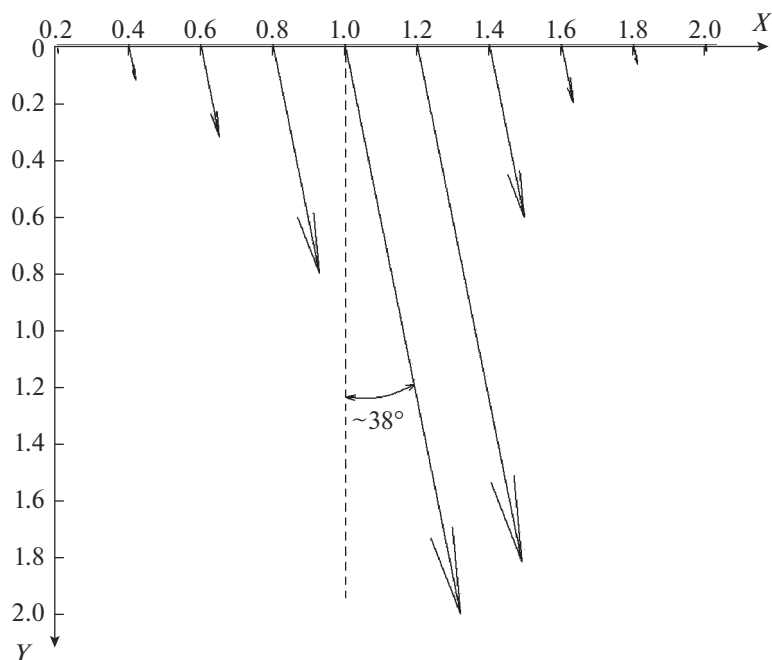


Рис. 7. Радиальное распределение рассчитанных горизонтальных скоростей течения ($v_r(r, z)$, $v_\phi(r, z)$) от центра кольца в слое Экмана подо льдом при $z = 20$ м. Штрихом обозначена касательная к контуру геострофического вихря (середины кольца). Максимальная длина стрелки соответствует скорости 7–10 см/с.

что аномальная гидрохимическая структура вод – результат подъема глубинных вод с низкой минерализацией и более высокой температурой через термоклин, причем подъем вод может быть вызван наличием газовых гидратов в донных отложениях, т. е. авторы этой статьи придерживаются газовой гипотезы формирования ледовых колец.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе [13] предложены две гипотезы образования вихрей. Первая – вихри образуются подо льдом, когда ледовый покров стабилен. В зимний период при синоптических изменениях атмосферного давления механическая энергия непрерывно переносится из атмосферы через лед в толщу воды. Как и в свободный ото льда период, возникают сейши, внутренние волны и нагоны, и их амплитуда сравнима с величинами, наблюдаемыми летом и осенью [6]. Вторая гипотеза – вихри образуются в какой-то момент между периодами осеннего вертикального перемешивания и образования льда. После вертикального перемешивания более теплая (и более легкая) вода остается на поверхности, в то время как вихрь опускается на глубину уровня нейтральной плавучести. Поверхностные вихри и ледовые кольца редко наблюдаются в начале зимы, лишь одно исключение было отмечено вблизи м. Нижнее Изголовье в 2009 г. В зимний период и особенно весной, когда верхний слой воды начинает прогреваться и стано-

вится менее плотным, вихрь поднимается вверх, в конечном счете достигая ледового покрова.

В работе [14] тех же авторов утверждается, что вихрь подо льдом образуется задолго до ледостава и является результатом воздействия поля ветра и выноса воды из Баргузинского залива за м. Нижнее Изголовье.

В данной работе развивается другая теория – геострофические вихри подо льдом в районах образования ледовых колец обусловлены рельефом дна, а именно – каньонами, и генерацией нового типа топографических вихрей – каньонных вихрей. А все остальное, в том числе и линзовидные образования в поле температуры подо льдом, – уже проявление эволюции самих каньонных вихрей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бордонский Г.С., Крылов С.Д. О природе кольцеобразных структур на спутниковых снимках ледяного покрова Байкала // Исследования Земли из космоса. 2014. № 4. С. 27–31.
2. Гранин Н.Г. Окольцованный Байкал // Наука из первых рук. 2009. Т. 27. № 3. С. 22–23.
3. Гранин Н.Г., Козлов В.В., Цветова Е.А., Гнатовский Р.Ю. Полевые исследования и некоторые результаты численного моделирования кольцевых структур на льду озера Байкал // Докл. РАН. 2015. Т. 461. № 3. С. 316–320, <https://doi.org/10.7868/S0869565215090194>

4. *Гранин Н.Г., Мизандронцев И.Б., Козлов В.В., Цветова Е.А., Гнатовский Р.Ю., Блинов В.В., Асламов И.А., Кучер К.М., Иванов В.Г., Жданов А.А.* Кольцевые структуры на ледовом покрове озера Байкал: анализ экспериментальных данных и математическое моделирование // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 11. С. 1890–1903. <https://doi.org/10.15372/GiG20181111>
5. *Зырянов В.Н.* Сейши подо льдом // Вод. ресурсы. 2011. Т. 38. № 3. С. 261–273. <https://doi.org/10.1134/S0097807811020163>
6. *Зырянов В.Н.* Теория установившихся океанических течений. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 248 с.
7. *Balkhanov V.K., Bashkuev Y.B., Khaptanov V.B.* Formation of circular rings on the snow covered ice field of Lake Baikal // Tech. Phys. 2010. Т. 80. № 9. С. 34–37. <https://doi.org/10.1134/S1063784210090057>
8. *Fox D.G.* Forced plume in a stably stratified fluid // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. № 33. P. 6818–6835.
9. *Granin N.G., Makarov M.M., Kucher K.M., Gnatovsky R.Y.* Gas seeps in Lake Baikal—detection, distribution, and implications for water column mixing // Geo Mar. Lett. 2010. Т. 30. № 3. P. 399–409. <https://doi.org/10.1007/s00367-010-0201-3>
10. *Hsu J.* Mystery of giant ice circles resolved. <http://www.livescience.com/strangenews/090601-ice-circles.html>. (дата обращения: 01.06. 2009)
11. *Kostianoy A.G., Belkin I.M.* A survey of observations on intrathermocline eddies in the World Ocean // Elsevier Oceanogr. Ser. 1989. Т. 50. P. 821–841. [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(08\)70223-X](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(08)70223-X)
12. *Kouraev A.V., Semovski S.V., Shimaraev M.N., Mognard N.M., Legresy B., Rémy F.* Ice regime of lake Baikal from historical and satellite data: Influence of thermal and dynamic factors // Limnol. Oceanogr. 2007. Т. 52. № 3. P. 1268–1286.
13. *Kouraev A.V., Shimaraev M.N., Rémy F., Ivanov A.Y., Golubov B.N.* An interesting natural phenomenon—giant rings on Lake Baikal ice // Eur. Geophys. Union (EGU) 2010. V. 12.
14. *Kouraev A.V., Zakharova E.A., Rémy F., Kostianoy A.G., Shimaraev M.N., Hall N.M.J., Suknev A.Ya.* Giant ice rings on lakes and field observations of lens-like eddies in the Middle Baikal (2016–2017) // Limnol. Oceanogr. 2016. V. 61. P. 1001–1014.
15. *Kouraev A.V., Zakharova E.A., Rémy F., Kostianoy A.G., Shimaraev M.N., Hall N.M.J., Zdorovenov R.E., Suknev A.Ya.* Giant ice rings on lakes and field observations of lens-like eddies in the Middle Baikal (2016–2017) // Limnol. Oceanogr. 2019. V. 64. № 6. P. 2738–2754.
16. *McCartney M.S.* Inertial Taylor columns on a beta-plane // J. Fluid Mech. 1975. V. 68. P. 71–96.