

01;03

## Феномен образования круговых колец на заснеженном ледовом поле озера Байкал

© В.К. Балханов, Ю.Б. Башкуев, В.Б. Хаптанов

Отдел физических проблем Бурятского научного центра СО РАН,  
670047 Улан-Удэ, Россия  
e-mail: ballar@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 18 августа 2009 г. В окончательной редакции 2 февраля 2010 г.)

На космических снимках ледовой поверхности озера Байкал обнаружены темные кольца диаметром  $\sim 7\text{--}8$  km. Можно дать физическую интерпретацию данного феномена, предположив, что формирование колец связано с выбросами теплого природного газа из осадочной толщи дна Байкала. Поднимаясь к поверхности, природный газ охлаждается, но успевает прогреть окружающую холодную воду. В результате в толще воды образуется конвекция в виде тора вокруг выброса природного газа, которая доносит теплую воду до поверхности (нижней кромки льда) в стороне от столбца природного газа. Благодаря теплопроводности тепло доходит до верхней кромки льда, где снег начинает интенсивно таять. В результате на заснеженном льду образуется проталина в виде кольца.

### Введение

Озеро Байкал в геологическом отношении представляет собой озеро — грабен — участок земной коры, ограниченный круто наклоненными разрывами, приуроченный к рифтовой зоне (рифт — крупная линейная тектоническая структура земной коры протяженностью сотни—тысячи километров). Рифты характеризуются повышенным тепловым потоком и сейсмической активностью. Повышенная температура приводит к интенсивному газообразованию. Выходы природного газа со дна озера летом наблюдаются благодаря поднимающимся на поверхность пузырям и в зимнее время — образованию „проталин“ (свободной ото льда поверхности воды) размером 0.5–100 m в поперечнике. Заполненные снегом проталины являются источником повышенной опасности для автомобилей. Помимо таких относительно небольших проталин на космических снимках озера Байкал обнаружены темные кольца аномально большого размера диаметром  $\sim 7\text{--}8$  km (рис. 1) [1]. Из-за значительного размера увидеть эти кольца со льда и даже с горных хребтов, окружающих котловину озера, практически невозможно. В апреле 2009 г. кольца были обнаружены западнее мыса Нижнее Изголовье полуострова Святой Нос (рис. 1, точка 1) и в южной оконечности Байкала (рис. 1, точка 2). На рис. 2 и 3 кольца „привязаны“ к батиметрической карте Байкала, где также указаны географические координаты центров колец [2] (батиметрические карты — географические карты, отображающие подводный рельеф при помощи изобат, дополненные отметками глубин).

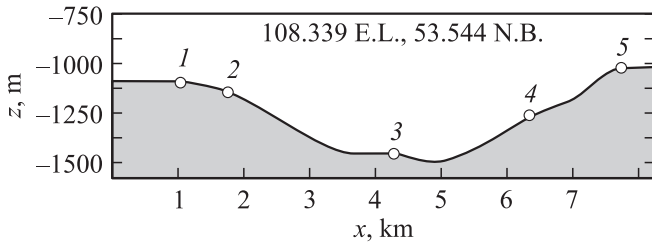
Целью настоящей работы является физическое объяснение образования колец на поверхности льда в результате конвекции всей толщи воды вокруг выброса природного газа, т.е. определение распределения температуры на поверхности, у нижней кромки льда. То,

что в процессе образования колец определяющую роль играют именно тепловые потоки, видно из рис. 4, где показано, как в результате нагрева нарушена прочность льда и он раскрошен на ледяные блоки разного размера [3].

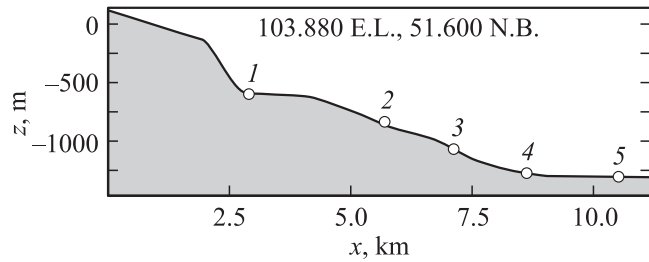
Вода озера Байкал характеризуется тем, что в весенний период температура по всей глубине практически не меняется и составляет обычно  $T_0 = 3.2\text{--}3.4^\circ\text{C}$ . Только вблизи поверхности, от глубины 150–200 m температура плавно уменьшается почти до нуля на поверхности. Возникающий градиент температуры столь незначителен, что конвекции воды не возникает (не рассматриваются внутренние течения толщи воды, не



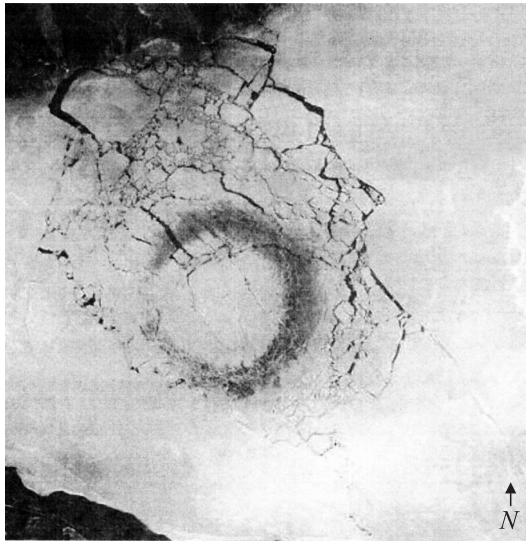
Рис. 1. Круговые кольца 1 (возле полуострова Святой Нос) и 2 (возле южной оконечности Байкала) на озере Байкал. Снимок от 4.04.2009 [1].



**Рис. 2.** Разрез кольца по широте на батиметрической карте возле полуострова Святой Нос. 1 и 5 — внешний край кольца, 2 и 4 — внутренний край кольца, 3 — центр кольца. Наверху даны географические координаты центра кольца.



**Рис. 3.** Разрез кольца по долготе на батиметрической карте возле южной оконечности Байкала. Цифрами обозначены: 1 и 5 — внешний край кольца, 2 и 4 — внутренний край кольца, 3 — центр кольца. Наверху даны географические координаты центра кольца.



**Рис. 4.** Разрушение ледяного поля в результате прогрева льда возле южной оконечности оз. Байкал. Фотография с борта Международной космической станции от 25.04.2009 [3].

связанные с температурной конвекцией). Таким образом, рассатриваемая задача существенно отличается от известной задачи конвекции Бенара—Рэлея.

## Теоретическое описание

Интенсивное газообразование можно описать как свободно поднимающуюся в толще холодной воды теплую ламинарную струю природного газа. Струя несет поток тепла (энергия в единицу времени)

$$Q = \rho_s C_p T V r^2 = \text{const.} \quad (1)$$

Здесь  $\rho_s$  — плотность смеси из байкальской воды и природного газа;  $C_p$  — теплоемкость смеси при постоянном давлении;  $T$  — абсолютная температура, отсчитываемая от температуры окружающей холодной воды;  $V$  — скорость всплытия струи;  $r$  — радиус поперечного сечения струи. Стационарная динамика всплытия струи описывается следующим уравнением [4]:

$$(V \cdot \nabla)V = -\nabla \frac{P}{\rho_s} - \beta_s g T + \nu_s \nabla^2 V. \quad (2)$$

Здесь  $\nabla$  — оператор Набла,  $P$  — давление,  $\beta_s$  — температурный коэффициент расширения смеси,  $\nu_s$  — вязкость смеси,  $g$  — ускорение свободного падения. Это уравнение получается из стационарного уравнения Навье—Стокса

$$(V \cdot \nabla)V = -\nabla \frac{P}{\rho_s} + \nu_s \nabla^2 V + g \quad (3)$$

следующим образом. Пусть  $P_0$  и  $\rho_0$  — равновесные значения, тогда

$$P = P_0 + \rho_s g z, \quad (4)$$

где к равновесному значению давления добавили гидростатическое давление, здесь  $z$  — высота, отсчитываемая от дна озера. При получении тепла плотность жидкости (смеси) меняется, причем

$$\rho_s = \rho_{s0} - \rho_{s0} \beta_s T. \quad (5)$$

При подстановке (4) и (5) в (3), с учетом того, что поправки к равновесным значениям малы, приходим к уравнению (2), где убран индекс „0“.

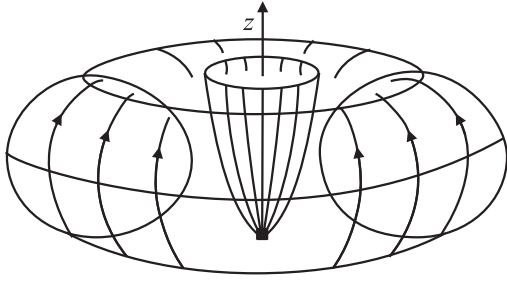
Поскольку все члены уравнения (2) одного порядка, то

$$\frac{V^2}{z} \propto \beta_s g T \propto \nu_s \frac{V}{r^2}. \quad (6)$$

Из (1) и (6) следует, что струя всплывает в виде фигуры вращения с осью  $z$ , причем (соотношения Зельдовича [7, стр. 310]):

$$r \propto \sqrt{z}, \quad V = \text{const}, \quad T \propto \frac{1}{z}. \quad (7)$$

Выражения (7) будут являться граничными условиями для задачи определения температуры окружающей воды, особенно интересной для нас. Ламинарная струя выходит из осадочной толщи дна из отверстия некоторого конечного размера, минимальный размер



**Рис. 5.** Качественная картина всплытия теплой струи природного газа и конвективное течение воды вокруг струи в виде сплюснутого тора. Заштрихованный квадрат внизу восходящей струи обозначает размер источника.

которого можно найти из выражения (1) и условия  $\rho_s V = \max$  [5, стр. 231]. Закономерность  $r \propto \sqrt{z}$  удобно конкретизировать и записать в следующем виде:

$$r = \sqrt{Dz}. \quad (8)$$

Радиальную переменную, описывающую координаты в плоскости  $xu$ , вне ламинарной струи, будем обозначать как  $R$ . Для параметров, описывающих байкальскую воду, свободную от природного теплого газа, индекс  $s$  не выписываем.

Неоднородное распределение температуры в воде, вызванное присутствием теплой струи природного газа, выводит окружающую жидкость из состояния механического равновесия. Возникает конвективное течение, которое в силу симметрии приобретает вид сплюснутого тора. Картина описанного процесса качественно показана на рис. 5, где стрелками указаны направления вращения потока воды. Распределение потенциального поля скоростей и температуры конвективного течения описывается следующей системой уравнений:

$$v(\nabla^2)^2 V = \beta g \nabla^2 T - \beta \nabla(g \cdot \nabla T), \quad (9)$$

$$(V \cdot \nabla) T_0 = \chi \nabla^2 T, \quad \nabla^2 T_0 = 0. \quad (10)$$

Здесь  $\chi$  — теплопроводность,  $T_0$  — температура неподвижной жидкости. Вывод этих уравнений аналогичен выводу системы уравнений, описывающих конвекцию Бенара–Рэлея [4, стр. 315], и производится следующим образом.

Во-первых, имеется уравнение (3), где убран индекс  $s$ . Кроме того, добавляется стационарное уравнение теплопроводности

$$(V \cdot \nabla) T = v \nabla^2 T \quad (11)$$

и условие потенциальности течения:

$$\nabla \cdot V = 0. \quad (12)$$

При конвекции температура незначительно меняется, поэтому необходимо  $T$  заменить на  $T_0 + T$ , где новое  $T$  — малая добавка к  $T_0$ , скорость  $V$  при конвективном

течении также является малой величиной. Поэтому в уравнении

$$(V \cdot \nabla) V = -\nabla \frac{P}{\rho} - \beta g T + v \nabla^2 V \quad (13)$$

можно пренебречь квадратом скорости. С учетом замены  $T$  на  $T_0 + T$  уравнение (10) принимает следующий вид:

$$(V \cdot \nabla) T_0 + (V \cdot \nabla) T = v \nabla^2 T_0 + v \nabla^2 T.$$

Пренебрегая малой величиной  $(V \cdot \nabla) T$  и отделяя величины разного порядка, приходим к уравнениям (10). Далее подействуем на уравнение (13) оператором  $\nabla \times (\nabla \times \dots)$ . Используя правила векторного анализа и уравнение (12), в итоге приходим к соотношению (9).

Из всего набора очевидных граничных условий [4, стр. 306] нам понадобится соотношение

$$T \left( \sqrt{x^2 + y^2} = r, z = 0 \right) \propto \frac{1}{z}. \quad (14)$$

Из (9) имеем следующие уравнения в плоскости  $xu$ :

$$v(\nabla^2)^2 V_R = -\beta g \nabla_R \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (15)$$

и проекция на ось  $z$ :

$$v(\nabla^2)^2 V_z = \beta g \nabla_z^2 T. \quad (16)$$

Здесь  $\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ .

Вблизи поверхности  $z = h$  компонента  $V_R$  почти не зависит от  $z$ , компонента  $V_z$  настолько мала, что ее можно вообще опустить. Тогда из (15) и (16) следует, что функция  $T(R, z)$  зависит от координаты  $z$  следующим образом:

$$T(R, z) = u(R) + v(R)z. \quad (17)$$

Поскольку температура  $T(R, z)$  отсчитывается от значения  $T_0$ , то в первом приближении можно принять  $T(R, z = h) = 0$ . Отсюда видно, что функции  $u(R)$  и  $v(R)$  имеют разные знаки. Кроме того, в месте соприкосновения воды со струей, когда  $R = r = \sqrt{Dz}$ , должно выполняться граничное условие (14). Этого можно добиться, если  $T(R, z)$  выбрать в следующем виде:

$$T(R, z) = ah^2 T_m \left( \frac{1}{R^2} - b \frac{hz}{R^4} \right). \quad (18)$$

Постоянные  $a$ ,  $b$  и  $T_m$  будут определены ниже.

При написании решения в виде (18) использовался общий метод, при котором решения системы уравнений, подобные (9) и (10), ищутся в таком виде, чтобы удовлетворять граничным условиям задачи [6].

Решение (18) обладает замечательной особенностью — зависимость  $T(R, z = h)$  имеет максимум. Из

этого следует, что в точке максимума

$$R_m = \sqrt{2bh} \quad (19)$$

и

$$a = 4b. \quad (20)$$

Так, для кольца на рис. 2  $R_m = 2.78$  km и  $h = 1.46$  km, откуда  $b = 1.81$  и  $a = 7.25$ . Чтобы установить смысл величины  $D$  в формуле (8), положим, что в месте соприкосновения воды со струей температура  $T_s = 0$  (лед и снег не тают). В точке максимума температура  $T_m = 4^\circ\text{C}$  (лед еще не тает, а снег уже растаял). Тогда, подставив  $R = \sqrt{Dz}$  в (18), для  $D$  получим квадратное уравнение, наименьшее решение которого будет

$$D = 4.04 \text{ km}. \quad (21)$$

Приведем следующие значения, относящиеся к кольцу № 2 (рис. 3):

$$R_m = 2.76 \text{ km} \quad \text{и} \quad h = 1.05 \text{ km},$$

$$b = 3.45, \quad a = 13.8 \quad \text{и} \quad D = 5.17 \text{ km}.$$

Они существенно отличаются от аналогичных значений для величин кольца № 1 (рис. 2). Такое различие, по-видимому, связано как с используемым приближением при решении уравнения (6), так и с различием рельефа дна для обоих колец. Скучные экспериментальные данные (фактически использовались только космические снимки и батиметрическая карта) не позволяют пока провести более подробный анализ феномена образования гигантских колец на льду.

## Заключение

Установлено, что образование колец на ледовой поверхности озера Байкал связано с гигантской конвекцией толщи воды из-за выброса теплого природного газа и осадочного дна озера. Конвекция в виде тора описывается совместными решениями уравнений Навье–Стокса и уравнения теплопроводности. Дано качественное решение этих уравнений вблизи поверхности воды. Из полученного решения следует, что поднимаясь к поверхности, природный газ охлаждается, но успевает прогреть окружающую холодную воду. В результате в толще воды образуется конвекция в виде тора вокруг выброса природного газа, которая доносит теплую воду до поверхности (нижней кромки льда) в стороне от столба природного газа. Благодаря теплопроводности тепло доходит до верхней кромки льда, где снег начинает интенсивно таять. В результате на заснеженном льду образуется проталина в виде кольца.

Работа частично поддержана грантами РФФИ № 08-01-98006, 08-02-98007, 08-05-98038, интеграционным проектом СО РАН № 56 и Фондом содействия сохранению озера Байкал.

## Список литературы

- [1] Веб-сервис MIRAVI <<http://miravi.eo.esa.int/en/>>.
- [2] Карта оз. Байкал. Главное управление навигации и океанографии Министерства обороны СССР, 1992.
- [3] <<http://eol.jsc.nasa.gov/scripts/sseop.photo.pl?mission=ISS019&roll=E&frame=10556>>.
- [4] Ладау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 736 с.
- [5] Компанеев А.С. Курс теоретической физики. Т. 2. Статистические законы. М.: Просвещение, 1974. 480 с.
- [6] Конвективные течения: Сб. науч. трудов. Пермь: ПГПИ, 1989. 120 с.