

ГЕОФИЗИКА

УДК [551.4.02/01:551.326.8](282.256.341)

**КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ НА ЛЕДОВОМ ПОКРОВЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ:
АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ
И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Н.Г. Гранин, И.Б. Мизандронцев, В.В. Козлов*, Е.А. Цветова, Р.Ю. Гнатовский,
В.В. Блинов, И.А. Асламов, К.М. Кучер, В.Г. Иванов, А.А. Жданов**

Лимнологический институт СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия

**Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия*

***Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630000, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6, Россия*

Гидрофизические исследования и математическое моделирование ледовых кольцевых структур на оз. Байкал показали, что их существование на стадии деградации ледового покрова обусловлено антициклоническими течениями, которые могут возникать в результате локального подъема глубинных вод. В свою очередь, подъем глубинных вод мы связываем со всплытием гидратов метана из верхнего слоя донных отложений и их диссоциацией. Анализ космических снимков показал, что линейные размеры радиусов ледовых колец составляют 1300—2400 м, что близко к бароклинному радиусу деформации Россби. Измеренные толщины льда в районе кольца соответствуют данным расчетов по модели. Со всплытием гидрата также может быть связано обновление глубинных вод озера.

Ледовый покров, кольцевая структура, течения, апвеллинг, гидрат метана, Байкал.

**NATURAL RING STRUCTURES ON THE BAIKAL ICE COVER:
ANALYSIS OF EXPERIMENTAL DATA AND MATHEMATICAL MODELING**

**N.G. Granin, I.B. Mizandrontsev, V.V. Kozlov, E.A. Tsvetova, R.Yu. Gnatovskii,
V.V. Blinov, I.A. Aslamov, K.M. Kucher, V.G. Ivanov, and A.A. Zhdanov**

Hydrophysical studies and mathematical modeling of ring structures on the Baikal ice cover have shown that their existence at the stage of ice cover degradation is due to anticyclonic currents. Such currents can be generated as a result of local upwelling, which we associate with the rise of methane hydrates from the top layer of bottom sediments and their dissociation. Analysis of satellite images shows that the radii of ice rings range from 1300 to 2400 m, which is close to the baroclinic Rossby radius of deformation. The measured ice thicknesses in the area of the rings are in agreement with model calculations. Deep water renewal in Lake Baikal can also be associated with the rise of hydrates.

Baikal ice cover, ring structure, currents, upwelling, methane hydrate

ВВЕДЕНИЕ

Геологические кольцевые структуры Земли, как и круговые образования в Мировом океане, различной природы и размеров хорошо известны и представляют собой объекты комплексных исследований. Ледовый покров может рассматриваться как природная модель тектонических процессов в земной коре [Гаккель, 1959; Добрецов и др., 2007]. На космических снимках Среднего Байкала в районе м. Крестовский весной 2003 г. впервые было зарегистрировано образование в виде темного кольца диаметром более 4 км [Гранин и др., 2005]. Последующий анализ спутниковой информации показал, что кольцевые структуры часто появляются на поверхности байкальского льда перед его разрушением. Их описанию

© Н.Г. Гранин[✉], И.Б. Мизандронцев, В.В. Козлов, Е.А. Цветова, Р.Ю. Гнатовский, В.В. Блинов, И.А. Асламов, К.М. Кучер, В.Г. Иванов, А.А. Жданов, 2018

[✉]e-mail: bwad@lin.irk.ru

DOI: 10.15372/GiG20181111

посвящен ряд публикаций [Гранин, 2009; Балханов и др., 2010; Kouraev et al., 2010, 2016; Бордонский, Крылов, 2014]. Они проявляются также на снимках 1974—2002 гг., обнаружено четыре случая их проявления на оз. Хубсугул [Kouraev et al., 2016].

Было высказано предположение, что возникновение кольцевых структур на ледовом покрове связано с генерацией кругового течения. Течения могут быть обусловлены подъемом глубинных вод (апвеллингом) в результате извержения подводных вулканов [Гранин и др., 2005]. Эти структуры проявляются на космических снимках из-за ускоренного протаивания льда в зоне кругового течения под влиянием усиления вертикального обмена. Последующие исследования показали, что подо льдом в районе апвеллинга возникает антициклоническое течение [Гранин, 2009].

В статье представлены результаты исследований ледовых кольцевых структур на Байкале и в местах их проявления в навигационный период [Гранин и др., 2005, 2015; Гранин, 2009]. Проводится анализ данных и результатов моделирования, рассматривается вопрос о причинах генерации круговых течений, определяющих образование кольцевых структур на стадии деградации ледового покрова.

МЕТОДЫ

Для обнаружения и мониторинга кольцевых структур, проявляющихся перед разрушением ледового покрова, использовались спутниковые данные в видимом диапазоне с пространственным разрешением 250 м (geol.irk.ru). Температура и электропроводность водной толщи подо льдом измерялись зондом SBE-19, а в период открытой воды — зондом SBE-25 с дополнительными датчиками кислорода и обратного рассеяния света. Пересчет удельной электропроводности *in situ* в ионную составляющую минерализации воды проводился по методике [Блинов и др., 2006]. Концентрация растворенного в воде метана определялась методом фазового равновесия [Большаков, Егоров, 1987] с использованием газового хроматографа «Эхо» с пламенно-ионизационным детектором. Измерения скорости подледных течений при работах на кольцевой структуре в 2009 г. осуществлялись при помощи трассеров, а в 2013 г. — электромагнитным измерителем INFINITY-EM.

Средний по восьми направлениям радиус колец (r) определялся в дату их регистрации по линии минимальных оптических плотностей на негативных спутниковых снимках. Бароклинный радиус деформации Россби (Ro) для двухслойной стратификации определялся по формуле [Cushman-Roisin, 1994; Cushman-Roisin et al., 2007]:

$$Ro = \sqrt{\left[g \frac{\Delta\rho}{\rho} \left(\frac{H_1 H_2}{H_1 + H_2} \right) \right]} / f, \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения, $\Delta\rho$ — разность плотности воды верхнего и нижнего слоя, ρ — плотность воды, H_1 — глубина залегания термоклина, H_2 — расстояние от термоклина до дна; $(H_1 + H_2)$ — глубина водоема, f — инерционная частота. При вычислении Ro для районов, где не проводились исследования в подледный период, температура верхнего слоя воды принималась равной 0.2 °С, а положение термоклина устанавливалось по ежегодной съемке по акватории озера в конце мая — начале июня.

Для описания гидротермодинамики несущей водной среды использовалась трехмерная математическая модель в негидростатическом приближении [Tsvetova, 1999; Цветова, 2011], представленная системой уравнений в частных производных для температуры и компонентов вектора скорости течений, а также уравнениями состояния и неразрывности. На основе измерений в ядре кольцевой структуры по этой модели восстановлены методом усвоения данных поля течений и температуры внутри и за пределами кольца [Гранин и др., 2015]. Кроме того, решалась задача о гидротермодинамике системы водный раствор метана — газовая фаза — газогидрат метана с учетом фазовых переходов и связанных с ними тепловых эффектов [Цветова, 2012а,б, 2015а,б; Tsvetova, 2015].

Математическое моделирование и описание динамики толщины ледового покрова оз. Байкал в периоды его нарастания и деградации осуществлялось в рамках одномерной модели [Козлов и др., 2010; Асламов и др., 2014; Aslamov et al., 2014, Гранин и др., 2015]. В ее основу положена нелинейная модификация задачи Стефана для контактирующих сред лед—вода—воздух с существенно различающимися теплофизическими свойствами. Для воспроизведения процессов, приводящих к появлению кольцевых структур, было выполнено их описание в рамках двумерной, осесимметричной относительно вертикальной оси структуры математической модели нарастания и таяния ледового покрова [Козлов, 2012; Гранин и др., 2015]. Согласование с крупномасштабной гидродинамической моделью осуществлялось через задание осредненных по времени полей скорости течений в районе кольца, используемых в осесимметричной модели как входные параметры. Коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии оценивались косвенным методом.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

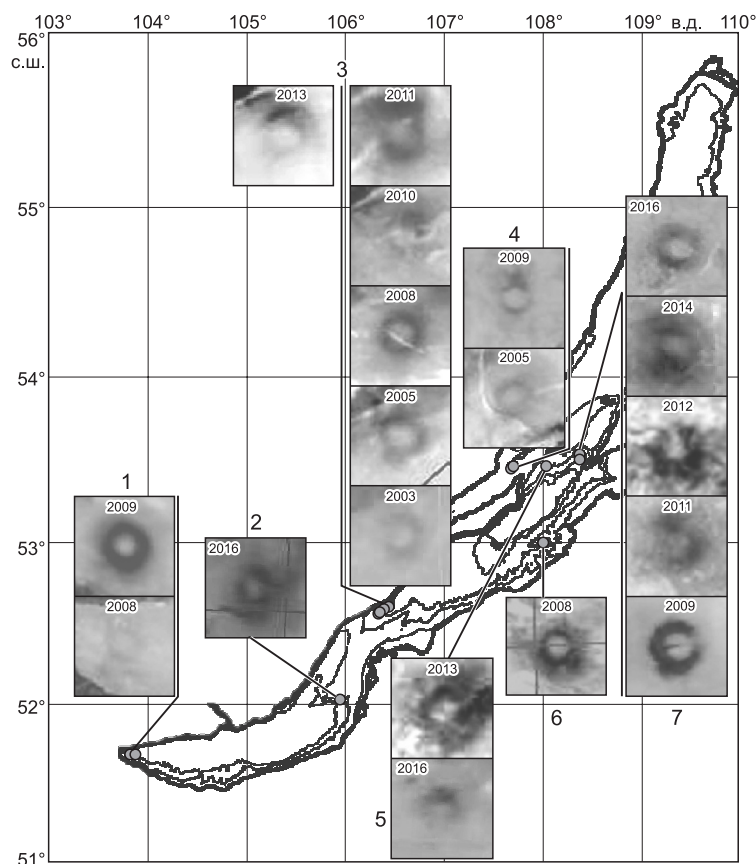
Кольцевые структуры на льду озера в период с 2003 по 2016 г. появлялись в семи районах 19 раз (рис. 1). Их характеристики представлены в таблице. Список, включающий в себя зимние и осенние структуры по Байкалу и Хубсугулу, приведен в работе [Kougaev et al., 2016].

Величины радиуса кольцевых образований изменяются от 1300 до 2400 м, что согласуется с радиусом деформации Россби. Время существования колец составляет от 2 до 30 сут и заканчивается к дате разрушения ледового покрова или несколько раньше из-за перемещения ледовых полей ветром и течениями (см. таблицу). Положение центров кольцевых структур в районах, где они появлялись неоднократно, меняется от года к году. Так, расстояние между центрами колец вблизи м. Крестовский в 2005 и 2008 гг. достигало 4 км, тогда как в 2003 г. он занимал промежуточное положение.

В 2009 г. кольцевые структуры у Култук (Южный Байкал) и у м. Нижнее Изголовье п-ова Святой Нос (Средний Байкал) проявились на космических снимках 4 апреля. Через три дня в районе первой из них проводились исследования. Визуально лед внутри кольцевой структуры, за ее пределами и в зоне «темного» кольца выглядел одинаково. На двух разрезах проводились измерения температуры и электропроводности подледной воды до глубины 95 м. Станции располагались в центре кольцевой структуры и на расстояниях 1, 2, 3 и 4 км от него. На разрезе восток—запад были дополнительно проведены измерения в 7 км от центра (рис. 2, а).

По разрезу восток—запад толщина льда уменьшается от 70 см в центре до 43 и 59 см в зоне темного кольца (2 км слева и справа от центра) и вновь увеличивается за его пределами (см. рис. 2, б). Измерения вертикального распределения температуры по станциям обоих разрезов свидетельствуют о повышении температуры воды более чем на $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 2, в) и понижении суммы ионов на 2 мг/кг в центральной части кольцевой структуры (см. рис. 2, г). Несмотря на повышение температуры во внутренней части кольцевого образования (см. рис. 2, в), толщина льда в ней была близка к толщине на удалении 7 км от центра (см. рис. 2, б). Из этого следует, что температура подледного слоя воды не является главным фактором, определяющим толщину ледового покрова.

На юго-восток от центра толщина снежного покрова увеличивалась, а толщина льда снижалась, поэтому на разрезе север—юг толщина льда в зоне собственно кольца была ниже (37 и 42 см). Поскольку станция Ц на пересечении разрезов несколько смещена относительно геометрического центра кольцевой структуры, минимум толщины льда на этом разрезе находится на ст. 3-Ю в 3 км от станции Ц (правая кривая, см. рис. 2, б). Заглубление изотерм в центре подтверждает существование геострофического антициклонического течения. Темный цвет



кольца на спутниковых снимках обусловлен повышением уровня воды в микротрещинах льда (см. рис. 2).

Повторная съемка 7 мая 2009 г. после разрушения ледового покрова показала, что температура верхнего слоя воды возросла до $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, тогда как ее различия в центральной и периферической зонах стали меньше $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Глубина залегания изотермы $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ в центре структуры больше на 50 м ее значения в периферической зоне, а скорости геострофических течений снизились по сравнению с апрелем 2009 г. с 6 до 3 см/с, что обусловлено уменьшением горизонтальных градиентов плотности воды.

Третья съемка в том же районе была проведена 3 июня 2009 г. Темпера-

Рис. 1. Карта положения кольцевых структур и спутниковые снимки с годами их появления.

1 — Култук, 2 — Посольская банка, 3 — м. Крестовский, 4 — Малое Море, 5 — Академический хребет, 6 — Турка, 7 — м. Нижнее Изголовье.

Координаты кольцевых структур, даты спутниковых снимков (см. рис. 1), средний радиус (r , м), радиус деформации Россби (R_0 , м) и время существования

Дата снимка	Район	с.ш.	в.д.	$\frac{R_0}{r}$	Время существования
14.IV.2003	м. Крестовский	52°35'55.2"	106°25'40.6"	$\frac{2100}{2000}$	8.IV—1.V
24.IV.2005	»	52°36'31.0"	106°27'28.5"	$\frac{2100}{2100}$	24.IV—1.V
22.IV.2008	»	52°35'12.6"	106°24'06.4"	$\frac{2100}{1900}$	17.IV—30.IV
30.IV.2010	»	52°34'01.8"	106°21'24.6"	$\frac{2100}{1400}$	30.IV—11.V
20.IV.2011	»	52°33'45.4"	106°21'50.7"	$\frac{2000}{1800}$	20.IV—27.IV
29.IV.2013	»	52°34'18.1"	106°21'15.1"	$\frac{2100}{2100}$	24.IV—4.V
26.IV.2008	Култук	51°40'57.1"	103°49'06.6"	$\frac{2000}{1800}$	26.IV—30.IV
19.IV.2013	»	51°40'26.6"	103°52'09.8"	$\frac{2000}{2100}$	4.IV—29.IV
22.IV.2008	Турка	52°59'29.3"	108°02'55.0"	$\frac{2100}{1800}$	17.IV—4.V
19.IV.2009	м. Нижнее Изголовье	53°31'34.7"	108°22'12.8"	$\frac{2300}{2400}$	4.IV—3.V
26.IV.2011	»	53°31'23.5"	108°24'00.8"	$\frac{2300}{2100}$	21.IV—29.IV
20.IV.2012	»	53°31'32.4"	108°23'34.2"	$\frac{2100}{2200}$	20.IV—21.IV
22.IV.2014	»	53°30'25.2"	108°23'16.9"	$\frac{2300}{2300}$	11.IV—23.IV
18.III.2016	»	53°31'23.2"	108°23'42.1"	$\frac{2100}{2200}$	22.II—20.IV
13.V.2005	прол. Малое Море	53°27'21.0"	107°41'22.2"	$\frac{1800}{1600}$	8.V—17.V
29.IV.2009	»	53°28'00.1"	107°42'19.0"	$\frac{1800}{2100}$	23.IV—6.V
10.V.2013	Академический хребет	53°27'51.7"	108°01'49.0"	$\frac{1700}{1300}$	5.V—14.V
16.IV.2016	»	53°35'30.0"	108°15'02.8"	$\frac{1400}{2000}$	16.IV—20.IV
16.IV.2016	Посольская Банка	52°00'18.0"	105°49'08.6"	$\frac{1800}{2400}$	16.IV—20.IV

тура воды слоя мощностью порядка 200—250 м, была понижена (см. рис. 2, д), что указывало на продолжение существования антициклонического вихря. Скорости геострофических течений понизились до 1 см/с.

В 2013 г. были выполнены исследования распределения температуры подледной воды в пределах кольцевой структуры, проявившейся на космических снимках 24 апреля в районе м. Крестовский (рис. 3, а). Одновременная регистрация скорости течений электромагнитным измерителем (см. рис. 3, б) и вертикальных профилей температуры на разрезе запад—восток (см. рис. 3, в) были проведены 30 апреля. Они свидетельствуют о существовании антициклонического течения.

В навигационный период были проведены измерения в водной толще на станциях, соответствующих местоположению кольца у м. Крестовский, а также на фоновой станции в середине разреза через озеро от р. Анга до р. Сухая в 30 км к западу от центра кольцевой структуры (рис. 4). В центре кольцевого образования на вертикальных профилях минерализации, температуры и концентрации растворенного кислорода заметен мощный перемешанный слой (см. рис. 4, а-в). По распределению температуры и кислорода он в меньших размерах отмечается на удалении 2 км.

Локальный прорыв глубинных вод к поверхности озера может быть связан с всплыванием газогидратов метана и их разрушением. Всплывающие в Байкале газогидраты были зарегистрированы при ледовых работах 2013 г., а в летний период отмечено их появление на поверхности озера [Макаров и др., 2014].

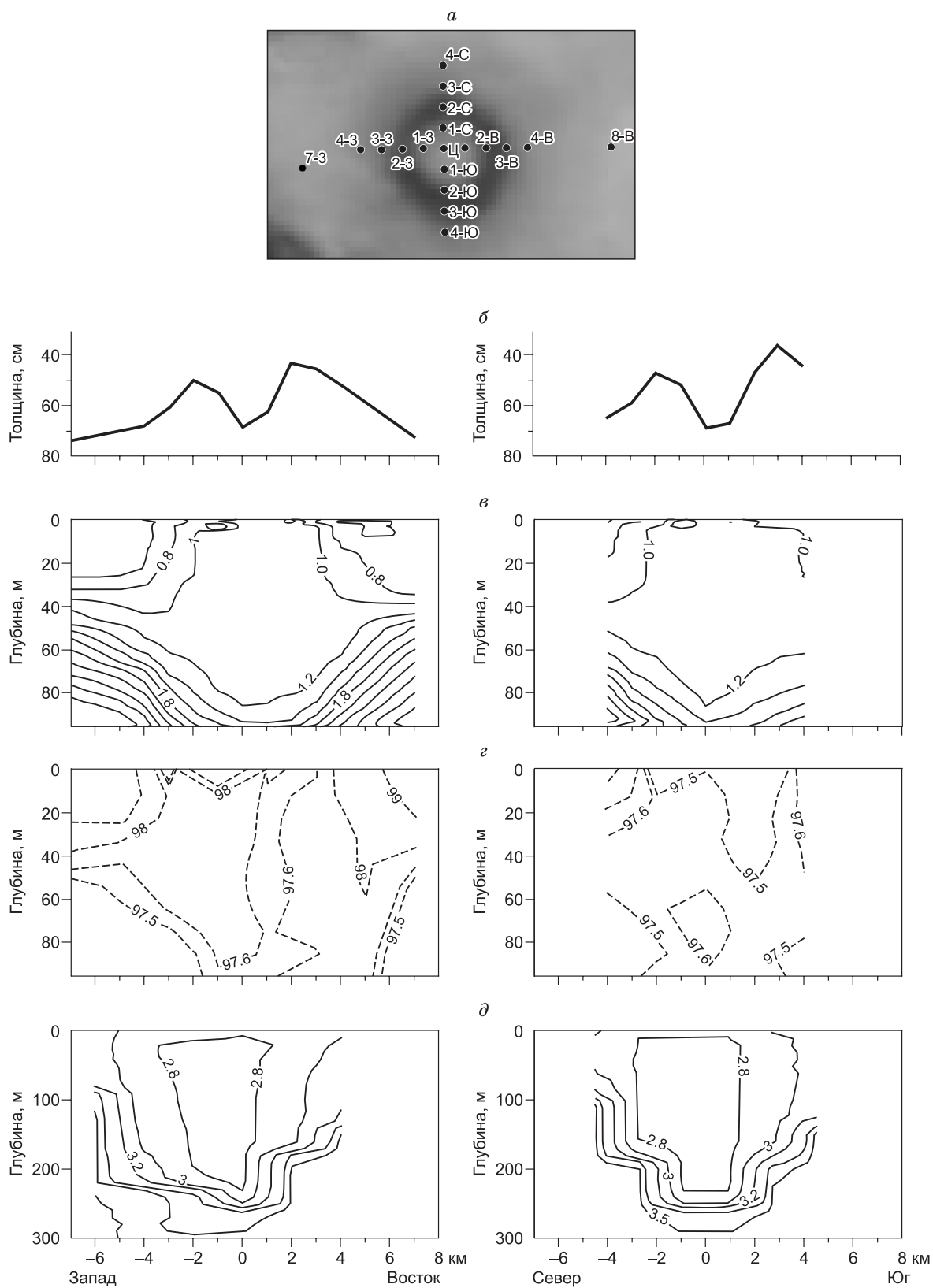
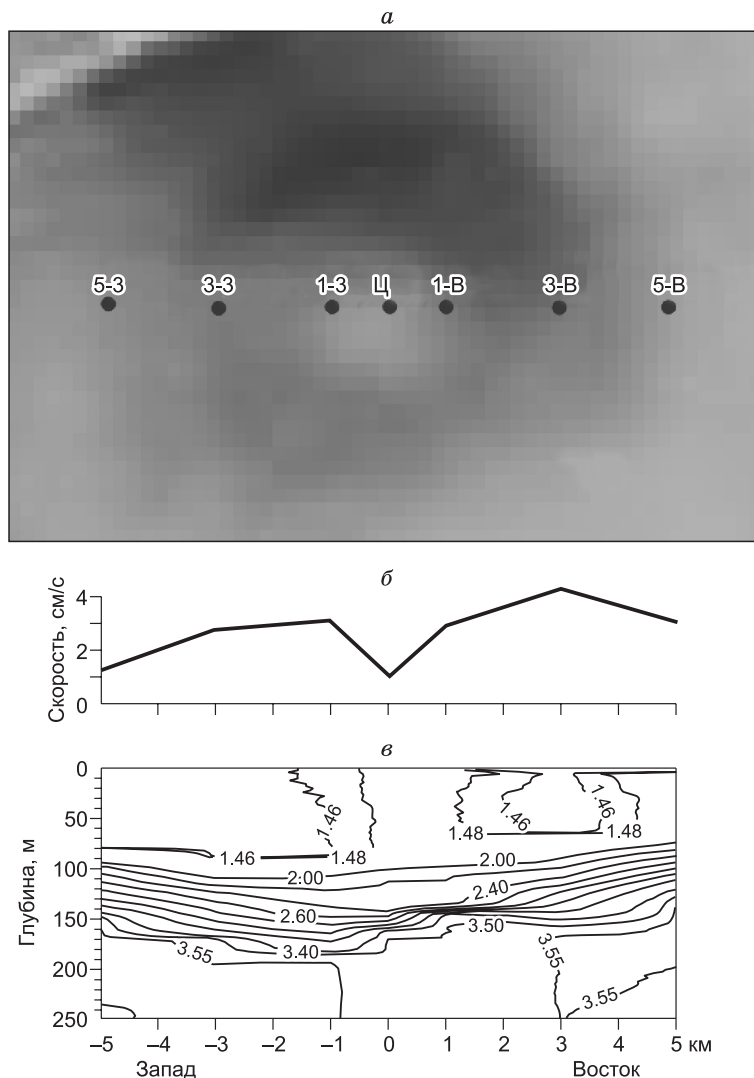


Рис. 2. Положение станций на разрезах в западной части Южного Байкала, пересекающих кольцевую структуру (*a*), толщина льда по разрезам (*б*), вертикальное распределение температуры ($^{\circ}\text{C}$) (*в*) и суммы ионов (мг/кг) (*з*) в подледной воде 7 апреля и распределение температуры ($^{\circ}\text{C}$) в районе кольца 3 июня 2009 г. (*д*).

Рис. 3. Спутниковый снимок кольцевой структуры у м. Крестовский 30 апреля 2013 г. (а), изменение модуля скорости подледных течений (б) и вертикальное распределение температуры (°С) воды в слое 0—250 м (в) на разрезе через структуру.



Уменьшение минерализации в перемешанном слое воды можно объяснить ее «распреснением» водой, освобождающейся при распаде всплывающих газогидратов. Среднее уменьшение суммарной концентрации основных ионов в слое порядка 200 м составило примерно 0.15 г/м^3 , что соответствует поступлению 0.32 м^3 химически чистой воды и распаду 0.42 м^3 гидратов в столбе под 1 м^2 водной поверхности (см. рис. 4).

Значительное количество гидратов метана, которые при всплывании и распаде снижают минерализацию воды, может поступать из газогидратных холмов, обнаруженных при погружении глубоководных обитаемых аппаратов «МИР» в районе грязевого влк. Санкт-Петербург [Egorov et al., 2010; Granin et al., 2012a]. Эти холмы, образованные монолитными скоплениями газогидратов, покрытых сверху тонким слоем ила, достигают 6 м высоты и примерно 25 м в диаметре [Egorov et al., 2010].

При математическом моделировании поведения гетерогенной системы, содержащей метан, предполагалось, что круговая структура возникает вследствие всплывания газогидрата метана из поверхностного слоя донных отложений. В качестве начальных условий принято однородное горизонтальное и реальное вертикальное распределение температуры воды, полученное в результате измерений вдали от кольца. По сценарию в определенном месте дна происходит одномоментное поступление газогидрата в покоящуюся водную среду, что изменяет эффективную плотность системы [Цветова, 2011, 2015a; Tsvetova, 2015].

Гидрат всплывает, увлекая за собой окружающие воды. При прохождении границы устойчивости он начинает интенсивно разлагаться с выделением газовой фазы и кристаллизационной воды, что приводит к понижению температуры и минерализации окружающей жидкости (рис. 5).

При моделировании изменений толщины льда с учетом круговых течений и нелинейных эффектов, связанных с генерацией больших вихрей, полагалось, что в крупномасштабной области спектра механизмы генерации турбулентной энергии в основном те же, что и в океане [Монин, Озмидов, 1981; Филатов, 1983].

Для оценок распределения скоростей течений и интерпретации данных о кольцевых структурах использованы квазигеострофические приближения [Stegner, 2007] уравнений движения геофизической гидродинамики вращающейся бароклинической жидкости. Согласованность полученных при этом подходе результатов с данными измерений в зоне кольцевой структуры (см. рис. 3) [Aslamov et al., 2014; Гранин и др., 2015], а также с численными экспериментами на негидростатической модели подтверждают гипотезу о генерации круговых течений.

При параметризации эффективной теплопроводности воды зависимость коэффициента горизонтального обмена от масштаба явления оценивалась на интервале 1—10 км, характерном для кольцевых структур [Монин, Озмидов, 1981]. Коэффициент горизонтальной эффективной теплопроводности

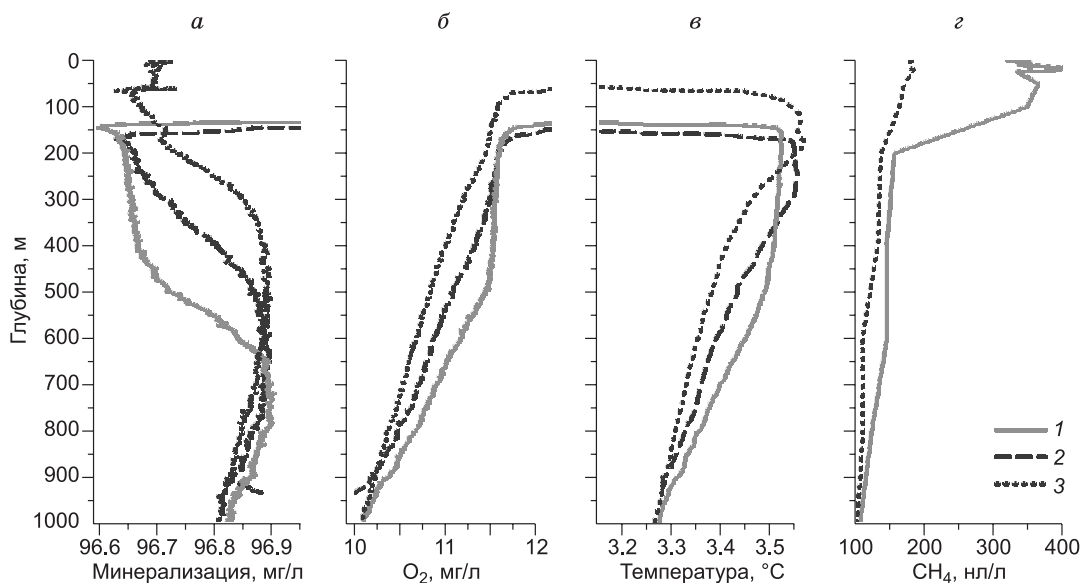


Рис. 4. Вертикальное распределение в июне 2013 г. минерализации (а), концентрации кислорода (б), температуры (в) и концентрации метана (з) на станциях разреза через кольцевую структуру у м. Крестовский и на фоновой станции в середине разреза р. Анга — р. Сухая.

1 — центр, 2 — ст. в 2 км к западу от центра, 3 — середина разреза р. Анга — р. Сухая.

водности в этой зоне масштабов при расчетах оценивался на диапазоне от $5 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^4$ $\text{cm}^2/\text{с}$. По результатам численных экспериментов, параметр пропорциональности для отношения коэффициентов горизонтального к вертикальному обмену принят равным $\beta = K_r(r, z, t)/K_z(r, z, t) = 5 \cdot 10^5$.

По результатам идентификации коэффициентной обратной задачи определен коэффициент $K_{\text{эф}}(z, t)$ эффективной температуропроводности с учетом измерений температуры в фоновом створе, представляющий функцию глубины горизонта [Aslamov et al., 2014]. Параметризация изменения коэффициента вертикального обмена вдоль радиуса кольцевой структуры была выбрана в виде зависимости $K_r(r, z, t) = \varphi(r) K_{\text{эф}}(z, t)$, где $\varphi(r)$ в общем случае аппроксимировалась кусочно-линейной функцией с неизвестными коэффициентами. Функция $\varphi(r)$ оценивалась по обратной задаче с учетом измерений толщины льда по радиусу кольца. Вид граничных условий основывался на данных изменения толщины льда и горизонтального распределения температуры на глубине 5—10 м в области кольцевой структуры в Южном Байкале, полученных в ходе экспедиционных работ на разрезах 7 апреля 2009 г.

Пример расчета изменений толщины ледового покрова на полуразрезе через кольцевую структуру приведен на рис. 6. Она уменьшается по мере удаления от центра до минимального значения на расстоянии, соответствующем положению темного кольца, и затем возрастает к периферии структуры и прилегающему участку ледового поля на удалении 7 км от центра. Расчетная кривая согласуется с данными прямых измерений толщины льда, а также коррелирует с изменениями скорости подледного течения, рассчитанной по квазигидростатической модели А. Стегнера [Stegner, 2006]. Сопоставление модельного расчета модуля скорости (см. рис. 6) с ее измеренными значениями (см. рис. 3, б) показывает их хорошую согласованность.

ОБСУЖДЕНИЕ

Процесс весенней деградации и разрушения монолитного байкальского льда с образованием иглообразных кристаллов подробно описан в работах [Сокольников, 1957, 1959; Верболов и др., 1965]. Когда ледовый покров пронизан микротрещинами и на поверхности льда уже нет воды от растаявшего снега, на космических снимках проявляются структуры в виде темных колец на светлом фоне. В темных участках толщина льда меньше по сравнению с окружающими зонами, а уровень воды в микротрещинах находится ближе к поверхности ледового покрова.

Появление кольцевых структур обусловлено круговыми течениями, ведущими к более быстрому таянию льда в зоне их интенсификации. С удалением от центра кольца и увеличением скорости течения растет значение числа Рейнольдса (Re), достигающего критического значения по экмановскому слою в

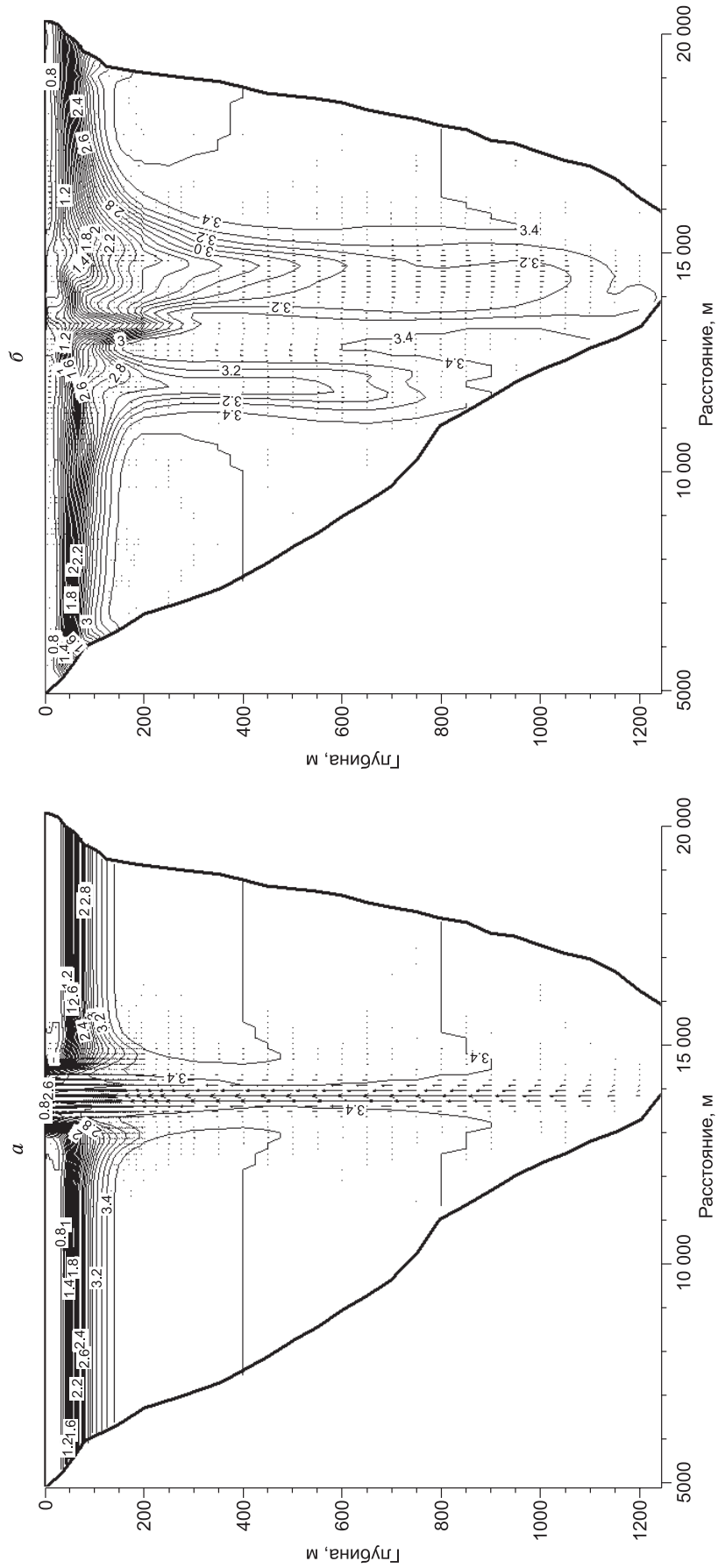


Рис. 5. Скорости течений и изотермы при апвеллинге, генерируемом всплытием и разложением газогидратов: через 2 ч после начала эксперимента (а); через 16 ч (б).

Фрагмент вертикального сечения области моделирования. Цифры — это изотермы (°С).

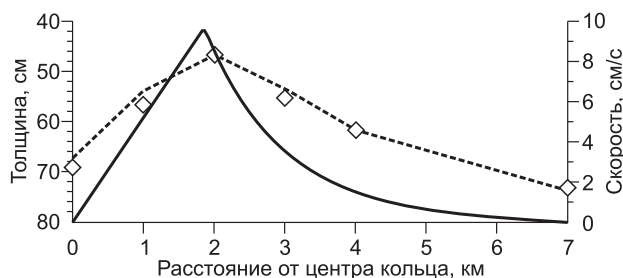


Рис. 6. Изменение на поперечном полуразрезе через кольцевую структуру средней измеренной толщины льда (ромбы), ее рассчитанных по модели величин (штриховая линия) и модуля скорости подледного течения, по модели А. Стегнера (сплошная линия).

зоне собственно кольца, что влечет за собой усиление турбулентности, интенсивности вертикального теплообмена и ускорение таяния льда на его нижней границе.

Вихревые образования часто наблюдаются в морях [Dugan et al., 1982; Cushman-Roisin, 1994; Cushman-Roisin et al., 2007; и др.] и озерах [Forrest et al., 2013; Kirillin et al., 2015]. Их размеры сопоставимы с бароклинным радиусом деформации Россби (R_o). Для измеренного в апреле 2009 г. вертикального распределения температуры водной толщи в западной части Южного Байкала получено хорошее соответствие между рассчитанным по уравнению (1) R_o и радиусом ледового кольца [Гранин и др., 2015]. Согласно нашим данным, размеры кольцевых структур близки к R_o (см. таблицу).

Генерация подледных течений представляет собой классический случай реализации геострофического равновесия (geostrophic adjustment). При этом не всегда можно определить, что является причиной — течение или апвеллинг/даунвеллинг, а что следствием. На стадии нарастания льда минерализация верхнего подледного слоя воды увеличивается вследствие вымораживания солей и остается повышенной до конца ледового периода [Гранин и др., 1999]. Если бы причиной образования кольцевых структур были обычные течения, то не отмечалось бы понижение минерализации и повышение температуры в центре кольцевой структуры, как это следует из наших измерений (см. рис. 2, 4). В подледный период источником более теплой воды с пониженной минерализацией может быть только глубинная зона (> 300 м). Поэтому мы считаем, что первопричиной формирования ледового кольца служит подъем глубинных вод, приводящий к заглоблению изотерм в центральной части структуры (см. рис. 2, 3 и 5), что способствует возникновению и поддержанию кругового течения. При этом повышение температуры поверхностного слоя подледной воды во внутренней части кольца не сказывается на толщине льда (см. рис. 2, 6).

Прямое доказательство присутствия газогидратов было получено при глубоководном бурении на оз. Байкал [Кузьмин и др., 1998]. В 2000 г. газовые гидраты были обнаружены в верхнем слое глубоководных илов, непосредственно под границей раздела вода—дно [Клеркс и др., 2003]. Присутствие в донных отложениях Байкала газовых гидратов структуры КС-II [Kida et al., 2006], говорит о возможности их существования на глубинах меньше 300 м. В апреле 2013 г. всплывающие объекты с плотностью газогидратов были зарегистрированы на эхограммах в водной толще Байкала во время ледовых работ на траверзе м. Кадильный (северо-западное побережье Южного Байкала) [Макаров и др., 2014]. Скорость их подъема составляла 40—42 см/с, тогда как ее значения для газовых пузырей диаметром 5—20 мм находятся в интервале от 17 до 26 см/с. В том же самом районе с борта НИС «Верещагин» в июле 2013 г. были зафиксированы фото- и видеосъемкой газогидраты, интенсивно разлагающиеся на водной поверхности.

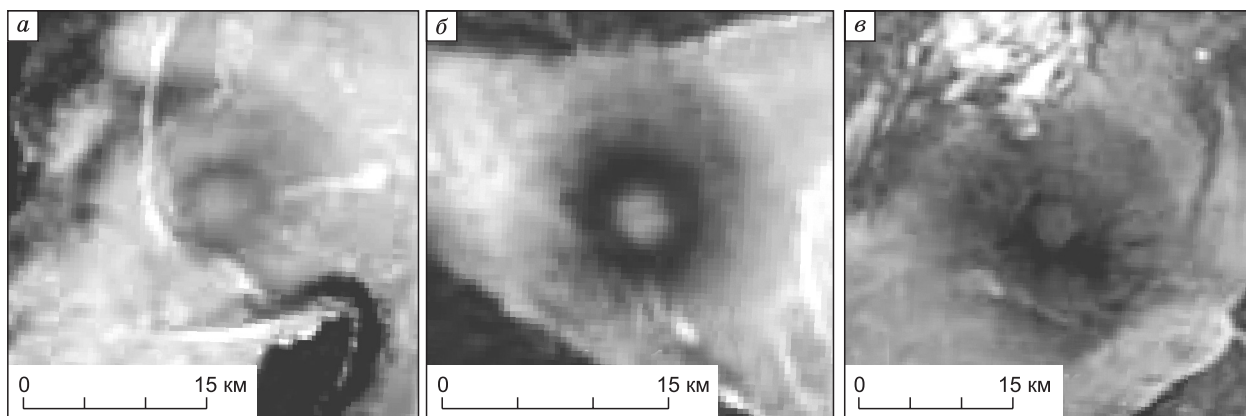


Рис. 7. Двойные кольцевые структуры в северной части прол. Малое Море (а) (2005 г.), в западной части Южного Байкала (б) (2009 г.) и в районе р. Турка (в) (2008 г.).

При частых землетрясениях в Байкальской рифтовой зоне происходит взмучивание верхнего полужидкого слоя ила (отмечающееся по временному локальному понижению прозрачности придонных вод [Granin et al., 2012b]), что ведет к подъему газогидратов. Таким образом, апвеллинг может быть связан со всплытием газогидратов метана и их разрушением. Это подтверждается существованием перемешанного слоя на глубинах от 400 до 200 м (см. рис. 4, б, в), уменьшением минерализации в центре кольца (см. рис. 2, г; рис. 4, а) и увеличением концентрации растворенного в воде метана от горизонта 200 м к поверхности озера (см. рис. 4, з).

В донных отложениях Байкала существуют гидраты метана разного генезиса с клатратными структурами КС-I и КС-II и различным содержанием примесей этана и других углеводородов [Калмычков и др., 2006; Kida et al., 2006]. Авторы работы [Lu, Sultan, 2008], основываясь на теории гидратов переменного состава и данных экспериментов ряда исследователей, показали, что даже малые примеси гомологов метана существенно влияют на глубину положения верхней границы устойчивости гидратов, определяемой гидростатическим давлением, температурой и составом. С увеличением доли этана от нуля (структура КС-I) до 5 мол. % и выше граница устойчивости перемещается в сторону меньших глубин, что определяет возможность существования гидратов на глубинах порядка 200—400 м.

Несомненный интерес представляют **двойные кольцевые структуры** на ледовом покрове Байкала (рис. 7). Первая из них была обнаружена нами в северной части прол. Малое Море весной 2005 г. Ее описание приведено в статье [Kouraev et al., 2016]. В последующие годы они проявлялись в Южном и Среднем Байкале. А. Кураев назвал их по аналогии с оптическим явлением кольцами с гало (halo).

Двойная структура состоит из кольца радиусом, близким к радиусу деформации Россби, которое окружено кольцом с линейным размером примерно в три раза большим (см. рис. 7). Можно предположить, что деформация изотермических поверхностей, вызванная апвеллингом в районе малого кольца и способствующая генерации антициклонического вихря, в данных условиях не затухает, а продолжается за внешней границей внутреннего кольца и приводит к возникновению компенсирующего циклонического течения.

По мере удаления от центра кольцевой структуры к внешнему кольцу возмущающее воздействие подъема глубинных вод уменьшается вследствие диссипации энергии. Поэтому большое кольцо размыто и проявляется менее ярко в виде ореола вокруг внутреннего. Тем не менее на космических снимках внешняя граница такого образования достаточно хорошо прослеживается на более светлом фоне ледового покрова (см. рис. 7). Согласно работе [Stegner, 2007], за внешней границей малого кольца модуль скорости течения и интенсивность вертикального обмена должны резко уменьшаться, чего в данном случае не наблюдается. Окончательное решение вопроса о механизме образования двойных структур требует проведения дальнейших исследований.

В литературе имеются **альтернативные гипотезы формирования кольцевых структур**. Так, по версии В.П. Балханова с соавторами, кольцевая структура появляется вследствие того, что «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» [Балханов и др., 2010, с. 37]. Для обоснования этих выводов была построена математическая модель, которая после упрощений и преобразований допускала аналитические решения.

Комментируя эту работу, заметим, что температура пресноводного льда при атмосферном давлении не может превышать 0 °С: весь восходящий поток тепла из водной толщи расходуется на таяние льда снизу и не вызывает разрушение снежного покрова. К тому же, по нашим данным, кольцевые структуры образовывались как на полностью заснеженном, так и на практически бесснежном льду. Поэтому испарение снега без плавления (сублимацию) также можно исключить из рассмотрения причин образования колец. Представление о возбуждении в подледной воде огромного тороидального вихря восходящим в водной толще потоком теплого газа, полученное в результате расчета по формулам упомянутой модели, противоречит экспериментальным данным. Измерениями установлена обратная температурная стратификация подледной воды как в районе кольцевой структуры, так и за ее пределами [Гранин и др., 2015; Kouraev et al., 2016], и глубоководных выходов газа в этом районе обнаружено не было [Granin et al., 2010, 2012a].

По Г.С. Бордонскому и С.Д. Крылову [2014], кольцевые образования формируются на неоднородностях ледового покрова при его двумерных деформациях с последующей самоорганизацией в виде кольцеобразной структуры под воздействием переменных тепловых потоков во льду, создаваемых солнечным излучением. Это никак не объясняет изменение толщины льда на разрезе через кольцевую структуру.

Другой версией причины образования колец служит представление о мегапузыре газа, накапливающегося под ледовым покровом [Kouraev et al., 2010]. Позже А. Кураев с соавторами [Kouraev et al.,

2016] отказались от гипотезы о газовом мегапузыре как универсальном объяснении образования вихревого водоворота, ведущего к формированию кольцевой структуры. Последующие исследования [Kougaev et al., 2016] подтвердили существование кругового течения в местах проявления кольцевых образований на ледовом покрове. Однако эти авторы считают, что ледовые кольца представляют собой поверхностные проявления движения воды под ледовым покровом в виде линзоподобных вихрей, но не объясняют причину их возникновения. Заметим, что в отличие от наших данных, их исследования показали повышенную минерализацию подледной воды в центре кольцевой структуры. Причиной различий является применение А. Кураевым с соавторами при пересчете данных зондирований в электропроводность при 25 °С соотношения для морской воды, которые имеются в программном обеспечении измерительного зонда, что некорректно.

Анализ результатов численных экспериментов с участием метана позволяет предположить, что его газогидраты играют существенную роль не только в образовании локальных кольцевых структур вблизи поверхности озера, но и в фундаментальных процессах, определяющих **обновление глубинных вод**.

В основной водной толще Байкала на глубинах, превышающих 250 м, постоянно существует небольшой градиент температуры, определяющий поток тепла сверху вниз. Тем не менее даже в течение многих десятилетий не было отмечено какого-либо повышения температуры глубинных вод [Shimaraev et al., 1994]. Это привело к предположению о существовании в озере компенсирующих механизмов. Доказательством действия таких механизмов могут служить наблюдения внезапных эпизодических минимумов температуры и появления повышенных концентраций кислорода в самых глубоких слоях водной толщи [Weiss et al., 1991; Шимараев, Гранин, 1991; Schmid et al., 2008; Tsimiri et al., 2015].

По данным [Tsimiri et al., 2015], наиболее частой причиной опускания поверхностных вод является экмановский перенос. Он возникает при ветрах определенного направления и генерирует нисходящие прибрежные течения, переносящие воду с более низкой температурой, чем окружающие воды, вдоль крутых склонов озерной котловины до максимальных глубин [Шимараев и др., 2015].

Исследования [Жданов и др., 2001; Wüest et al., 2005] показали, что на Байкале ветровые течения, формирующиеся перед ледоставом, полностью затухают подо льдом за 40—45 сут. Если принять во внимание, что длительное время от установления ледового покрова до его разрушения озеро изолировано от атмосферы, то наблюдаемые в этот период эпизодические понижения температуры глубинных вод невозможно объяснить последствиями действия механизма экмановского переноса.

Результаты моделирования (см. рис. 5, б) позволяют предположить, что понижение температуры глубинных вод и повышение в них концентраций кислорода обусловлены процессами, связанными со всплытием и разложением гидрата метана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наши исследования ледовых кольцевых структур на Байкале показали, что их существование на стадии деградации и разрушения ледового покрова обусловлено круговыми течениями. Причиной генерации антициклонических течений мы считаем локальный подъем глубинных вод, связанный со всплытием газогидратов метана и их диссоциацией. Этому есть ряд экспериментальных подтверждений: существование перемешанного слоя на глубинах от 400 до 200 м, уменьшение минерализации в центре кольца и увеличение концентрации растворенного в воде метана от горизонта 200 м к поверхности озера.

Кроме того, численное моделирование гидротермодинамики вод и динамики ледового покрова позволило воспроизвести основные характеристики наблюдаемых кольцевых структур. Анализ результатов численных экспериментов с участием метана показал, что его газогидраты, кроме организации кольцевых структур на льду, также могут играть существенную роль в процессах обновления глубинных вод озера.

Авторы выражают благодарность академику И.В. Бычкову за полезные замечания, а также М.М. Макарову и С.Н. Алехину за содействие в проведении работ.

Работа выполнена при поддержке государственных заданий институтов: ЛИН СО РАН — № 0345-2016-0008 (полевые исследования, обработка гидрофизических и спутниковых данных), ИДСТУ СО РАН — № 0348-2017-0012 (математическое моделирование толщины ледового покрова выполнено в рамках проекта), ИВМиМГ СО РАН — № 0315-2016-0004 (гидродинамические расчеты).

ЛИТЕРАТУРА

Асламов И.А., Козлов В.В., Мизандронцев И.Б., Кучер К.М., Гранин Н.Г. Оценка потока тепла на границе вода—лед на Байкале по экспериментальным данным // ДАН, 2014, т. 457, № 4, с. 477—480.
Балханов В.К., Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б. Феномен образования круговых колец на заснеженном ледовом поле озера Байкал // Журнал технической физики, 2010, т. 80, вып. 9, с. 34—37.

- Блинов В.В., Гранин Н.Г., Гнатовский Р.Ю., Жданов А.А., Римкус С.** Определение водных масс в озере Байкал методом T, S-анализа // География и природные ресурсы, 2006, № 2, с. 63—69.
- Большаков А.М., Егоров А.В.** Об использовании методики фазово-равновесной дегазации при газометрических исследованиях // Океанология, 1987, т. 27, вып. 5, с. 861—862.
- Бордонский Г.С., Крылов С.Д.** О природе кольцевых образований на спутниковых снимках ледяного покрова озера Байкал // Исследования Земли из космоса, 2014, № 4, с. 27—31.
- Верболов В.И., Сокольников В.М., Шимараев М.Н.** Гидрометеорологический режим и тепловой баланс озера Байкал. М., Л., Наука, 1965, 374 с.
- Гаккель Я.Я.** Природное «моделирование» тектонических деформаций на ледяной коре // Изв. Всесоюзного географического общества, 1959, № 1, с. 27—41.
- Гранин Н.Г.** Окольцованный Байкал // Наука из первых рук, 2009, № 3, с. 22—23.
- Гранин Н.Г., Джусон Д., Гнатовский Р.Ю., Левин Л.А., Жданов А.А., Аверин А.И., Горбунова Л.А., Цехановский В.В., Дорошенко Л.Ф., Минько Н.П., Грачев М.А.** Турбулентное перемешивание вод озера Байкал в слое, непосредственно примыкающем ко льду, и его роль в развитии диатомовых водорослей // ДАН, 1999, т. 366, № 6, с. 835—839.
- Гранин Н.Г., Вюшт А., Гнатовский Р.Ю., Капитанов В.В.** Свидетельства активности грязевых вулканов на Байкале // Четвертая Верещагинская байкальская конференция: тезисы докладов и стеновых сообщений, 26 сентября — 1 октября 2005 г. Иркутск, Ин-т географии СО РАН, 2005, с. 52—53.
- Гранин Н.Г., Козлов В.В., Цветова Е.А., Гнатовский Р.Ю.** Полевые исследования и некоторые результаты численного моделирования кольцевой структуры на льду озера Байкал // ДАН, 2015, т. 461, № 3, с. 343—347.
- Добрецов Н.Л., Псахье С.Г., Ружич В.В., Попов В.Л., Шилько Е.В., Гранин Н.Г., Тимофеев В.Ю., Астафуров С.В., Димаки А.В., Старчевич Я.** Ледовый покров озера Байкал как модельная среда для изучения тектонических процессов в земной коре // ДАН, 2007, т. 412, № 5, с. 656—660.
- Жданов А.А., Гранин Н.Г., Шимараев М.Н.** О механизмах генерации подледных течений в Байкале // ДАН, 2001, т. 377, № 3, с. 392—395.
- Калмычков Г.В., Егоров А.В., Кузьмин М.И., Хлыстов О.М.** Генетические типы метана озера Байкал // ДАН, 2006, т. 411, № 5, с. 672—675.
- Клеркс Я., Земская Т.И., Матвеева Т.В., Хлыстов О.М., Намсараев Б.Б., Дагурова О.П., Голубокова Л.П., Воробьева С.С., Погодаева Т.П., Гранин Н.Г., Калмычков Г.В., Пономарчук В.А., Шоджи Х., Мазуренко Л.Л., Каулио В.В., Соловьев В.А., Грачев М.А.** Гидраты метана в поверхностном слое глубоководных осадков озера Байкал // ДАН, 2003, т. 393, № 6, с. 822—826.
- Козлов В.В.** Комплексные исследования кольцевых структур на льду озера Байкал с применением технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента // Ляпуновские чтения. Материалы конференции. Иркутск, ИДСТУ СО РАН, 2012, с. 23.
- Козлов В.В., Мизандронцев И.Б., Асламов И.А., Кучер К.М., Макаров М.М., Горнов А.Ю., Гранин Н.Г.** Моделирование динамики толщины ледового покрова Байкала // Вестн. АГТА, 2010, № 4, с. 74—82.
- Кузьмин М.И., Калмычков Г.В., Гелетий В.Ф., Гнилуша В.А., Горегляд А.В., Хахаев Б.Н., Певзнер Л.А., Каваи Т., Йошида Н., Дучков А.Д., Пономарчук В.А., Конторович А.Э., Бажин Н.М., Махов Г.А., Дядин Ю.А., Кузнецов Ф.А., Ларионов Э.Г., Манаков А.Ю., Смоляков Б.С., Мандельбаум М.М., Железняков Н.К.** Первая находка газогидратов в осадочной толще озера Байкал // ДАН, 1998, т. 362, № 4, с. 541—543.
- Макаров М.М., Муякшин С.И., Кучер К.М., Гнатовский Р.Ю., Гранин Н.Г.** Извержения и нестационарность пузырьковых выходов газа на озере Байкал // Газовые гидраты в экосистеме Земли. Материалы Российской конференции. 7—10 апреля 2014 г. Новосибирск, ИНХ СО РАН, 2014, с. 38.
- Монин А.С., Озмидов Р.В.** Океанская турбулентность. Л., Гидрометеиздат, 1981, 319 с.
- Сокольников В.М.** Некоторые закономерности формирования и роста ледяного покрова // Труды Байкальской Лимнологической станции СО АН СССР. М., Л., 1957, т. XV, с. 58—64.
- Сокольников В.М.** О радиационных свойствах льда и снега и о некоторых явлениях ледового режима Малого моря // Труды Байкальской Лимнологической станции СО АН СССР. М., Л., 1959, т. XVII, с. 54—136.
- Филатов Н.Н.** Динамика озер. Л., Гидрометеиздат, 1983, 168 с.
- Цветова Е.А.** Моделирование локальных явлений, связанных с присутствием метана в водной толще озера Байкал // Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования. Материалы 39 конференции. Ростов-на-Дону, Изд-во ЮФУ, 2011, с. 230—234.
- Цветова Е.А.** Математическое моделирование процессов, приводящих к обновлению глубинных вод Байкала // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии. Труды Всероссийской научной конференции с международным участием. Барнаул, ИВЭП СО РАН, 2012а, т. 1, с. 156—159.

Цветова Е.А. Моделирование локальных явлений на фоне крупномасштабных процессов в озере Байкал // Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования. Экология. Экономика. Информатика. Материалы XL конференции. Ростов-на Дону, Изд-во ЮФУ, 2012б, с. 198—203.

Цветова Е.А. Моделирование тепломассообмена в Байкале в зимний период с учетом фазовых переходов в системе вода—метан // Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования. Материалы Международной молодежной школы и конференции по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде. 26—30 июня 2015 г. Томск, Изд-во ТЦНТИ, 2015а, с. 81—84.

Цветова Е.А. Обновление глубинных вод Байкала как следствие диссоциации метангидратов (по результатам численного моделирования) // Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики. Труды Международной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика Г.И. Марчука. Новосибирск, 2015б, с. 73—74.

Шимараев М.Н., Гранин Н.Г. К вопросу о стратификации и механизме конвекции в Байкале // Докл. АН СССР, 1991, т. 321, № 2, с. 381—385.

Шимараев М.Н., Гранин Н.Г., Гнатовский Р.Ю., Блинов В.В. О механизме аэрации кислородом придонных вод озера Байкал // ДАН, 2015, т. 461, № 4, с. 463—467.

Aslamov I.A., Kozlov V.V., Kirillin G.B., Mizandrontsev I.B., Kucher K.M., Makarov M.M., Gornov A.Yu., Granin N.G. Ice-water heat exchange during ice growth in Lake Baikal // J. Great Lakes Res., 2014, v. 40, № 3, p. 599—607.

Cushman-Roisin B. Introduction to geophysical fluid dynamics. Dartmouth College. Englewood Cliffs. Prentice Hall, 1994, 320 p.

Cushman-Roisin B., Korotenko K.A., Galos C.E., Dietrich D.E. Simulation and characterization of the Adriatic Sea mesoscale variability // J. Geophys. Res., 2007, v. 112, p. 1-13, doi:10.1029/2006JC003515.

Dugan J.P., Mied R.R., Mignerey P.C., Schuetz A.F. Compact intrathermocline eddies in the Sargasso Sea // J. Geophys. Res., 1982, v. 87, p. 385—393, doi: 10.1029/JC087iC01p00385.

Egorov A.V., Nigmatulin R.I., Rimskii-Korsakov N.A., Rozhkov N.A., Sagalevich A.M., Chernyaev E.S., Granin N.G., Zemskaya T.I., Khlystov O.M., Kalmichkov G.V. Gas hydrate hills on the bottom of Lake Baikal // 10th International conference on gas in marine sediments. 2010, p. 102.

Forrest A.L., Laval B.E., Pieters R.S., Lim D.S. A cyclonic gyre in an ice-covered lake // Limnol. Oceanogr., 2013, v. 58, p. 363—375, doi:10.4319/lo.2013.58.1.0363.

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-Marine Lett., 2010, v. 30, № 3-4, p. 399—409.

Granin N.G., Muyakshin, S.I., Makarov M.M., Kucher K.M., Aslamov I.A., Granina L.Z., Mizandrontsev I.B. Estimation of methane fluxes from bottom sediments of Lake Baikal // Geo-Marine Lett., 2012a, v. 32, № 5, p. 427—436, doi:10.1007/s00367-012-0299-6.

Granin N.G., Radziminovich N.A., Granina L.Z., Blinov V.V., Gnatovskiy R.Y. Freshening of near-bottom waters in Lake Baikal triggered by the M_w 6.2 Kultuk earthquake of August 2008 // Geo-Marine Lett., 2012b, v. 32, № 5, p. 453—464.

Kida M., Khlystov O., Zemskaya T., Takahashi N., Minami H., Sakagami H., Krylov A., Hachikubo A., Yamashita S., Shoji H., Poort Jeffrey, Naudts L. Coexistence of structure I and II gas hydrates in Lake Baikal suggesting gas sources from microbial and thermogenic origin // Geophys. Res. Lett., 2006, v. 33, № L24603, p. 1—4.

Kirillin G.B., Forrest F.L., Graves K., Fischer A., Engelhardt C., Laval B.E. Axisymmetric circulation driven by marginal heating in ice-covered lakes // Geophys. Res. Lett., 2015, v. 42, № 8, p. 2893—2900.

Kouraev A., Shimaraev M., Remy F., Ivanov A., Golubov B.D. An interesting natural phenomenon — giant rings on Lake Baikal ice // Proceedings of ESA Living Planet Symposium, Bergen, 2010, v. 12, EGU2010-8453.

Kouraev A.V., Zakharova E.A., Remy F., Kostianoy A.G., Shimaraev M.N., Hall N.M.J., Suknev A.Ya. Giant ice rings on lakes Baikal and Hovsgol: Inventory, associated water structure and potential formation mechanism // Limnol. Oceanogr., 2016, v. 61, p. 1001-1014, doi: 10.1002/ino.10268.

Lu Z., Sultan N. Empirical expressions for gas hydrate stability law, its volume fraction and mass-density at temperatures 273.15 K to 290.15 K // Geochem. J., 2008, v. 42, p. 163—175.

Schmid M., Budnev N.M., Granin N.G., Sturm M., Schurter M., Wüest A. Lake Baikal deepwater renewal mystery solved // Geophys. Res. Lett., 2008, v. 35, № L09605, p. 1—5.

Shimaraev M.N., Verbolov V.I., Granin N.G., Sherstyankin P.P. Physical limnology of Lake Baikal: a review. Print № 2. Irkutsk-Okayama, 1994, 81 p.

Stegner A. Experimental reality of geostrophic adjustment // Nonlinear dynamics of rotating shallow water: methods and advances. Chapter 6 / Ed. V. Zeitlin, Elsevier, 2007, v. 2, p. 323-377, doi: 10.1016/S157-6909(06)02006-5.

Tsimiri C., Rockel B., Wuest A., Budnev N.M., Sturm M., Schmid M. Drivers of deep-water renewal events observed over 13 years in the South Basin of Lake Baikal // J. Geophys. Res. Oceans, 2015, v. 120, p. 1508-1526, doi:10.1002/2014JC010449.

Tsvetova E.A. Mathematical modelling of Lake Baikal hydrodynamics // Hydrobiologia, 1999, v. 407, p. 37—43.

Tsvetova E.A. Modeling of hydrodynamics of water-methane heterogeneous system // 21st International symposium «Atmospheric and ocean optics: Atmospheric Physics». 2015, doi:10.1117/12.2205998.

Weiss R.F., Carmack E.C., Koropalov V.M. Deep-water renewal and biological production in Lake Baikal // Nature, 1991, v. 349, p. 665-669.

Wüest A., Ravens Th.M., Granin N.G., Kosis O., Schurter M., Sturm M. Cold intrusions in Lake Baikal: Direct observational evidence for deep-water renewal // Limnol. Oceanogr., 2005, v. 50, № 1, p. 184—196.

*Рекомендована к печати 1 марта 2018 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию 30 ноября 2016 г.,
после доработки — 17 августа 2017 г.*