

## РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

УДК 556.555.5:556.556.2(282.256.341)

### КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ НА ЛЬДУ ОЗЕРА БАЙКАЛ И ЛОКАЛЬНЫЕ АПВЕЛЛИНГИ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД<sup>1</sup>

© 2022 г. Н. Г. Гранин<sup>а</sup>, Д. В. Зырянов<sup>б</sup>, Р. Ю. Гнатовский<sup>а</sup>\*, В. В. Блинов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, 664033 Россия

<sup>б</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

\*e-mail: gnat@lin.irk.ru

Поступила в редакцию 12.10.2021 г.

После доработки 20.10.2021 г.

Принята к публикации 22.10.2021 г.

Кольцевые структуры на льду оз. Байкал обнаружены на спутниковых снимках во время уменьшения толщины ледового покрова (апрель). Анализ спутниковой информации о температуре поверхности озера летом показал, что в навигационный период иногда проявляются локальные области уменьшения температуры поверхности воды. Согласно полевым исследованиям кольцевых структур на льду озера, причина возникновения и развития которых – течения, которые способствуют уменьшению толщины льда. Данные свидетельствуют о том, что причиной генерации антициклонических течений может быть локальный подъем глубинных вод. Аналогичные явления наблюдаются в летний период. Данные спутниковых измерений температуры свидетельствуют о локальных понижениях температуры поверхности озера летом вследствие подъема вод. Это непосредственно связано с подъемом “холодной” воды из глубинной зоны. При разной температурной стратификации (прямой и обратной) апвеллинг способствует генерации циклонического или антициклонического кругового течения соответственно. Разное направление течений – следствие различий температурной стратификации зимой и летом. Образование кольцевых структур на льду и локальные понижения температуры поверхности летом – следствие локального подъема вод (апвеллинга). Причиной апвеллинга может быть конвекция. Понижение плотности нижележащей воды может происходить за счет: а) повышения температуры; б) понижения минерализации; г) повышения концентрации растворенного в воде метана в придонной зоне. Кроме этого, восходящие потоки могут быть следствием всплывания газовых гидратов.

*Ключевые слова:* Байкал, гидрофизика, кольцевые структуры на льду, апвеллинг, выходы метана, газовые гидраты.

**DOI:** 10.31857/S0321059622020079

#### ВВЕДЕНИЕ

История изучения оз. Байкал началась с посещения его первыми европейскими путешественниками в XVII в. В 1928 г. основана Байкальская Лимнологическая станция, которая в 1961 г. была преобразована в Лимнологический институт. Кольцевые структуры на льду оз. Байкал впервые были обнаружены в 2003 г. у м. Крестовского. Ретроспективный анализ спутниковых данных показал их наличие у м. Крестовского в 1999 г. [7, 8]. Гипотезы причин их появления описаны многими авторами [2, 4, 7, 8, 10, 11, 33–35]. Рост интереса к кольцевым структурам на льду озера связан с их регистрацией с борта МКС в 2009 г. Полевые исследования и моделирование свидетельствуют

о том, что возникновение кольцевых структур на льду обусловлено генерацией круговых течений.

Изучение течений на оз. Байкал началось в 1960-х гг. Основное внимание при исследованиях уделялось навигационному периоду, так как скорости течений в период открытой воды больше и возможности регистрации и расчета течений шире [1, 5, 14–17, 36]. Зимой скорости в большей части озера оказывались ниже порога чувствительности (2 см/с) существовавших в то время регистраторов течений. На основе расчетов геострофических течений [17] и их измерений регистраторами БПВ-2 и БПВ-2р [5] в навигационный период установлено, что оз. Байкал, как и другие озера северного полушария, охвачено общей циклонической циркуляцией, которая распадается на ряд ячеек. Исследования подтвердили понижение температуры в центрах циркуляционных ячеек, связанных с апвеллингом [37].

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке ЛИН СО РАН (бюджетный проект 0279-2021-0004) и РФФИ (проект 19-05-00522-а).

Показано, что понижение температуры в центрах циркуляций может способствовать развитию холодолюбивого диатомового фитопланктона [30].

После формирования устойчивого ледового покрова течения достаточно быстро затухают. В прибрежной области на небольших (до 7 м) глубинах течения после становления ледового покрова затухают в течение суток [13]. В придонной зоне пелагической части озера после ледостава постоянная времени затухания достигает 1.5 мес. [38]. Это означает, что к апрелю (когда образуются кольцевые структуры на льду озера) осенние ветровые течения затухают и не могут быть причиной уменьшения толщины льда. Вероятность генерации зимних подледных течений за счет стока рек невелика, так как в зимний период сток рек минимален. В навигационный период постоянная времени затухания ветровых течений близка к 1 сут [6]. Это примерно равно времени затухания прибрежных течений после ледостава [16]. Несмотря на затухание ветровых течений, общая (геострофическая) циклоническая циркуляция подо льдом сохраняется [5].

В данной статье приведены спутниковые и полевые данные исследований кольцевых структур на льду и локальных понижений температуры поверхности в безледный период. Проведен анализ информации о локальных понижениях температуры поверхности озера в навигационный период и о кольцевых структурах на поверхности ледового покрова озера, возникающих в апреле на стадии уменьшения толщины льда. Показана возможная общность механизмов формирования круговых течений летом и кольцевых структур на поверхности ледового покрова.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для обнаружения и мониторинга кольцевых структур на льду озера использованы спутниковые данные в видимом диапазоне с пространственным разрешением 250 м. Температура поверхности озера рассчитывалась по данным AVHRR с использованием алгоритмов из работы [19]. Температуру и электропроводность водной толщи измеряли зимой зондом SBE-19, летом — SBE-25. В подледный период измерения проводили со льда, в навигационный период — с научно-исследовательских судов Лимнологического института. Пересчет электропроводности *in situ* в ионную составляющую минерализации проводился по методике в [3]. Для измерения концентрации растворенного кремния использовалась стандартная методика [12]. Учет концентрации кремния при расчете плотности воды проводился согласно [28]. При расчете плотности воды и частоты Вайясяля использовалось уравнение состояния TEOS-2010 [29]. Бароклиный радиус дефор-

мации Россби  $Ro$  для двухслойной стратификации определялся по формуле [21].

Измерения течений при работах на кольцевой структуре в 2009 г. проводились с использованием трассеров в виде смоченной бумаги, которая медленно погружалась в подледную воду, что давало возможность отслеживать скорость и направление подледных течений, позже для измерений течений использовались электромагнитные регистраторы Infinity.

## МЕТОДИКА И ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

До получения экспедиционных данных в 2009 г., имея только спутниковую информацию, авторы статьи предполагали, что возникновение кольцевых структур связано с генерацией циклонических течений. Это подтверждалось спутниковыми данными о температуре поверхности озера в летний период. В 1996–1999 гг. было зарегистрировано 11 случаев локальных понижений температуры поверхности в Южном и Среднем Байкале, в 2000–2020 гг. было 16 случаев (табл. 1).

Понижение температуры поверхности летом могло быть связано с подъемом глубинных вод, и в случае геострофического равновесия оно соответствует циклоническому течению (против часовой стрелки). При анализе температуры поверхности были использованы спутниковые данные AVHRR, обработанные сотрудниками Института солнечно-земной физики (ИСЗФ) СО РАН в 1996–1999 гг., позднее эпизодически использовались данные MODIS.

Анализ данных позволил установить, что иногда проявляются небольшие, до 6 км, участки неоднородностей полей температуры в Южном и Среднем Байкале (рис. 1). Некоторые данные ввиду отсутствия облачности позволяют оценить время существования локальных понижений температуры в летний период.

На рис. 2 показано понижение температуры поверхности у м. Ухан, которое существовало ~4 сут — с 9 по 13 августа. Кроме этого, видно локальное понижение температуры у прол. Ольхонские Ворота (рис. 2в, 2г). Некоторое понижение температуры (рис. 2д) обусловлены облачностью. Радиусы “кольцевых” структур меняются от 3 до 6 км (табл. 1; рис. 1, 2). Различия температуры достигают 6°C.

При отсутствии профилей температуры во время апвеллинга в указанных районах (табл. 1) можно использовать фоновые данные о вертикальном распределении температуры для других районов поверхности озера. На рис. 3 приведено вертикальное распределение температуры на разрезе м. Елохин — р. Давша (3, 7 и 27 км от м. Елохин). Минимальная температура (~6°C) была на

**Таблица 1.** Характеристики локальных проявлений понижения температуры поверхности воды в некоторых районах Байкала, обнаруженных по спутниковым снимкам за период 1996–2020 гг.

Район	Дата появления	Продолжительность, ч	с.ш.	в.д.	Радиус, км	Разница температуры, °С
м. Ижимей–м. Ухан	12.07.1996	33	53.083	107.683	4	4
прол. Ольхонские Ворота	12.07.1996	33	52.901	106.955	3	5
п. Култук	10.08.1996	5*	51.689	103.788	2.5	3
м. Ухан	10.08.1996	5*	52.901	107.364	4	3
п. Гремячинск	10.08.1996	5*	52.919	107.697	4	3
Кукуйский каньон	17.08.1998	3*	52.624	106.763	5	4
п. Гремячинск	19.10.1998	14	52.883	107.773	6	2
м. Ижимей	14.06.1999	3	53.175	107.850	5.5	2
м. Ухан	09.07.1999	88	53.061	107.546	4	6
прол. Ольхонские Ворота	11.07.1999	3	52.950	106.970	4	6
п. Турка	01.09.1999	3*	53.097	108.068	3	5
прол. Ольхонские Ворота	05.08.2000	*	52.910	106.912	2.8	3
п. Култук	15.07.2001	*	51.667	103.908	3	4
м. Ижимей – м. Ухан	21.07.2002	24*	53.093	107.572	4	2
прол. Ольхонские Ворота	24.09.2002	24*	52.949	107.161	5	3
п. Култук	02.09.2004	48*	51.694	103.817	5	4
п. Култук	04.10.2005	*	51.692	103.812	5.5	2
п. Култук	30.05.2008	*	51.679	103.796	4	2
прол. Ольхонские Ворота	10.08.2008	*	52.885	106.926	3.5	2
прол. Ольхонские Ворота	21.08.2011	*	52.920	106.953	4	4
Академический хребет	24.10.2011	60*	53.540	107.892	6	2
м. Толстый	29.06.2012	84*	51.713	104.572	4	3
м. Лиственичный	13.07.2014	*	51.797	104.982	7	4
м. Ухан	15.07.2018	*	53.032	107.470	7	3
прол. Ольхонские Ворота	22.10.2019	36*	52.906	106.986	7	2
м. Ухан	04.07.2020	48*	53.030	107.533	4	7
п. Култук	13.06.2020	*	51.672	103.914	3	1

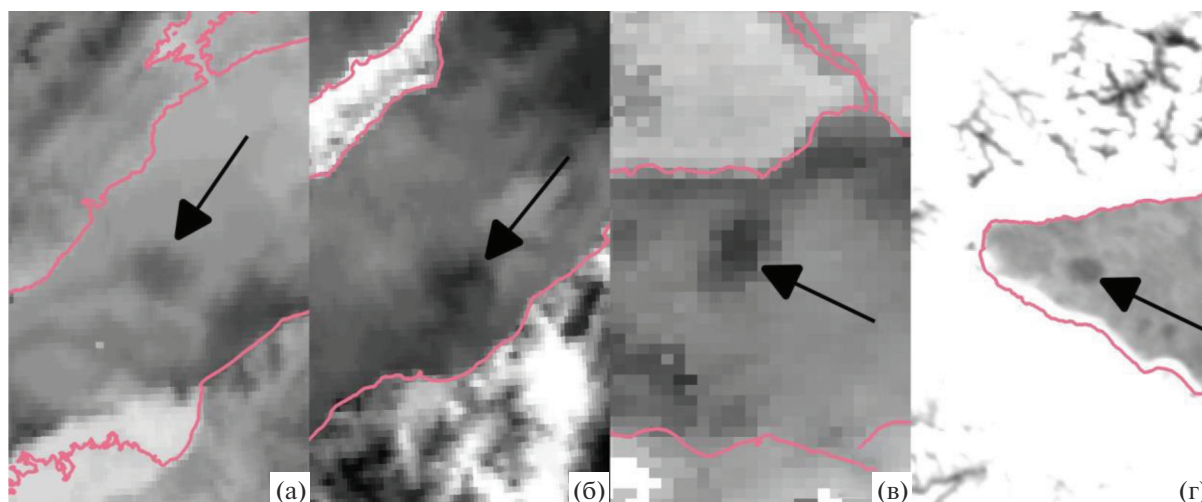
\* Случаи, когда облачность не позволяла точно определить продолжительность существования неоднородностей.

станции в 7 км, а максимальная – в 28 км от м. Елохин. Различия температуры ( $\sim 10^\circ\text{C}$ ) немного превышает приведенные в табл. 1 величины. Анализ данных о вертикальных распределениях температуры [36] (с 1934 г.) и электропроводности воды [3] (с 1995 г.), показывает, что вертикальные распределения температуры и минерализации (рис. 3) достаточно типичны для летнего периода. Показателем подъема вод, кроме понижения температуры, может служить вертикальное распределение минерализации (рис. 3). В районе апвеллинга профиль минерализации однородный, что подтверждает усиление вертикального обмена.

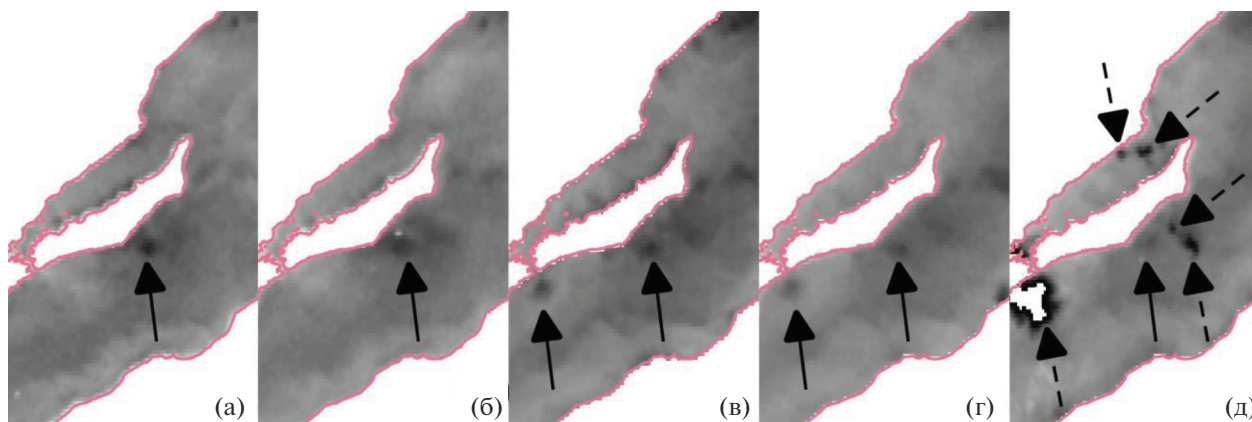
С 2003 г., когда была обнаружена первая кольцевая структура на льду озера у м. Крестовского, по 2009 г. было несколько поездок для проведе-

ния наблюдений в районах появившихся колец на льду. Все они не были удачны, так как использовались автомобили, на которых запрещено передвигаться по разрушающемуся льду. И только в 2009 г., когда кольцевые структуры появились в Западной части Южного Байкала и у м. Нижнее изголовье, их удалось исследовать с помощью катера на воздушной подушке “Хивус” [7, 10, 19].

При исследовании района кольцевой структуры на льду в западной части Южного Байкала лед в центре кольцевой структуры, на ее периферии и в районе “темного” кольца выглядел одинаково. В районе “темного” кольца наблюдалось большее количество пропарин. На разрезах, пересекающих кольцевую структуру с С на Ю и с В на З, проводились измерения с применением зонда SBE-25 до глубины 95 м. На разрезе с С на Ю



**Рис. 1.** Спутниковые снимки температурных неоднородностей поверхности воды в разных районах озера: Кукуйский каньон (Средний Байкал), 17.08.1998 (а); м. Ижимей (Средний Байкал), 14.06.1999 (б); м. Толстый (Южный Байкал), 29.06.2012 (в) и 13.06.2020 (г). Локальные понижения температуры поверхности обозначены стрелками.



**Рис. 2.** Спутниковые снимки температуры поверхности озера в районе м. Ухан (а–д) и прол. Ольхонские Ворота (в, г) в июле 1999 г. (день – время): 9 июля – 15:50 (а); 10 июля – 16:43 (б); 10 июля – 18:29 (в); 12 июля – 05:24 (г); 13 июля – 07:35 (д). Локальные понижения температуры поверхности обозначены стрелками, облачность – пунктирными стрелками.

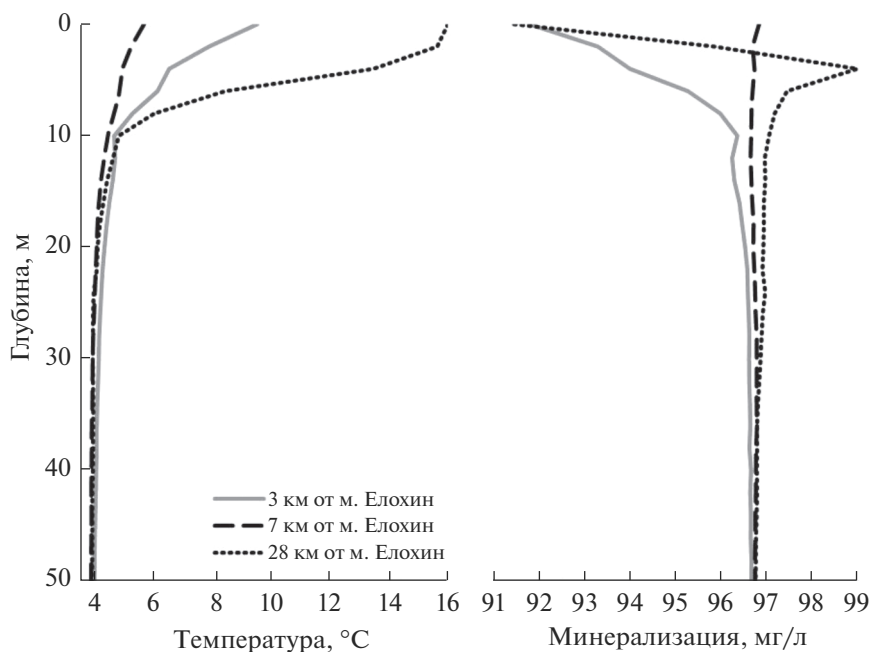
станции располагались в центре кольцевой структуры и на расстоянии 1, 2, 3 и 4 км от нее. На разрезе с В на 3 были дополнительно проведены измерения на станциях в ~7 км от центра (рис. 4) [11].

На разрезах наблюдается увеличение температуры и уменьшение минерализации в центральной части кольцевой структуры (рис. 5). Скорее всего, это связано с подъемом глубинных вод, так как в глубинной зоне наблюдаются те же тенденции изменений характеристик воды.

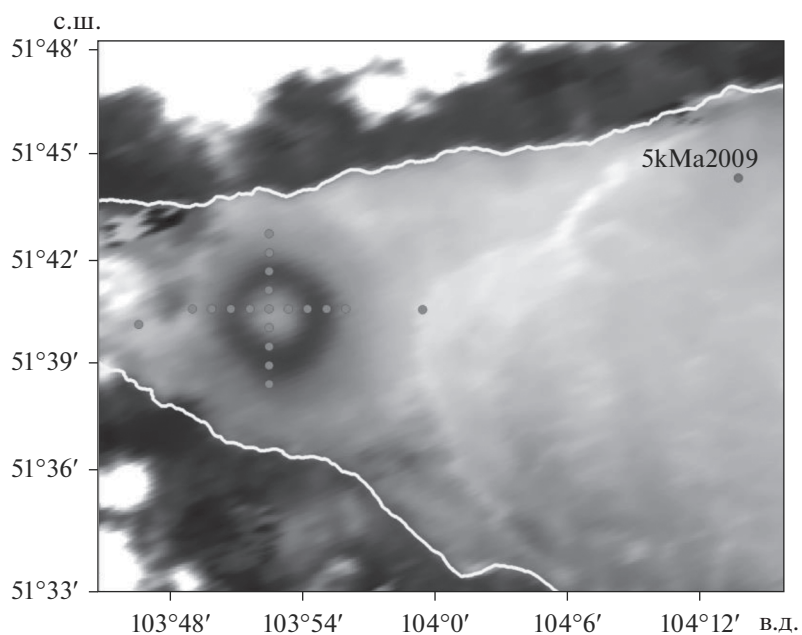
Схема расположения кольцевых структур, обнаруженных перед разрушением льда, на поверхности льда оз. Байкал представлена на рис. 6. С 2003 по 2021 г., по данным авторов статьи, они появлялись 23 раза в восьми районах. Наиболее

часто кольцевые структуры появляются у мысов Крестовского (6 раз) и Нижнее Изголовье (5 раз). Несколько раз кольцевые структуры появлялись в Западной части Южного Байкала (4 раза), в северной части прол. Малое Море, на Академическом хребте и у Посольской банки (2 раза). Один раз они были зарегистрированы у п. Турка (рис. 6). В последние годы (2017–2020 гг.) кольцевые структуры появлялись в основном на Южном Байкале.

Многолетние наблюдения за глубоководными факелами [18, 25, 26] позволили установить, что кольцевые структуры на льду расположены в основном достаточно далеко от газовых факелов. Только в одном случае – на Академическом хреб-



**Рис. 3.** Вертикальное распределение температуры и минерализации в фоновых районах и районах апвеллинга в летний период (июль 2019 г.).



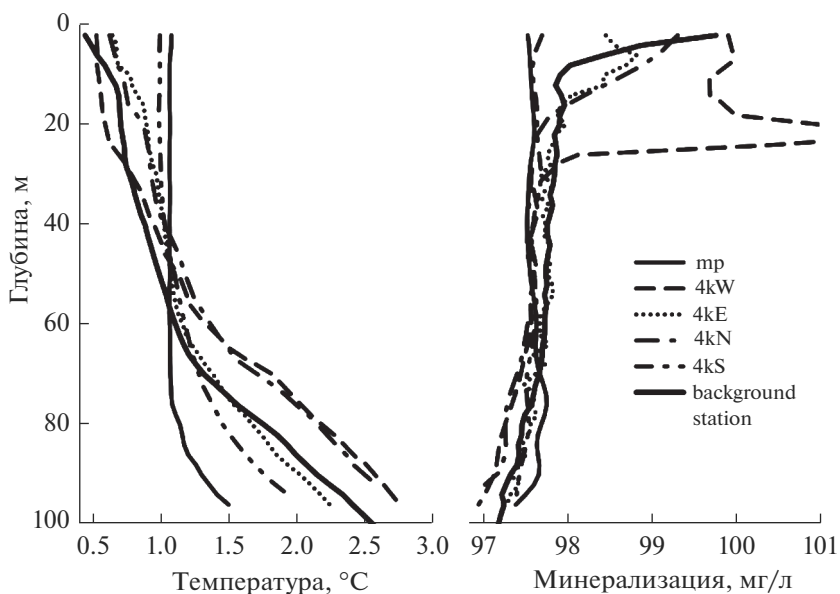
**Рис. 4.** Космический снимок кольцевой структуры в видимой части спектра и схема станций, 7 апреля 2009 г. Расстояние между станциями основных разрезов – 1 км. На разрезе 3–В две дополнительные станции в 7 км от центра. Станция в 5 км от п. Маритуй (5kMa2009) – фоновая.

те – газовый факел близок к положению кольцевой структуры на льду.

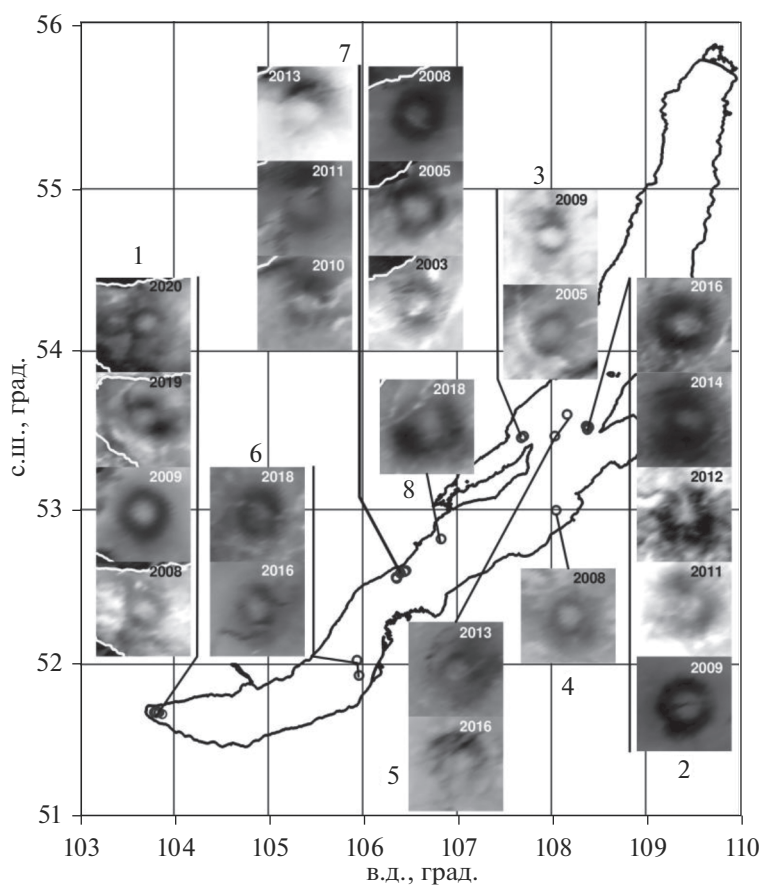
#### ОБСУЖДЕНИЕ

Спутниковые данные свидетельствуют о том, что круговые образования в пелагической части

оз. Байкал наблюдаются как летом, так и зимой. Летом они проявляются как локальные участки понижения температуры диаметром до 6 км. Весной, когда озеро покрыто льдом, кольцевые структуры видны на космических снимках ледового покрова озера. Их радиусы близки к  $R_0$  [10, 11]. Зимой и летом круговые структуры связаны с



**Рис. 5.** Вертикальное распределение температуры и минерализации в районе кольцевой структуры у п. Култук в апреле 2009 г.: в центре кольцевой структуры (mp), в 4 км на З (4kW) и на В (4kE), на фоновой станции (background) в 5 км от п. Маритуй (5кMa2009). Схема станций показана на рис. 4.



**Рис. 6.** Схема расположения и спутниковые снимки кольцевых структур, проявившихся на льду оз. Байкал перед разрушением ледового покрова в 2003–2020 гг. Районы: 1 – п. Култук, 2 – м. Нижнее Изголовье, 3 – м. Арал – м. Хобой (Малое Море), 4 – п. Турка, 5 – Академический хребет, 6 – Посольская банка, 7 – м. Крестовский, 8 – прол. Ольхонские ворота.

генерацией течений. Различие состоит лишь в том, что вследствие вертикальной изменчивости температуры при обратной температурной стратификации генерируются антициклонические, а при прямой температурной стратификации (летом) – циклонические течения. При этом зимой происходит заглупление изотермических поверхностей в центре кольцевой структуры (рис. 5). Летом при апвеллинге глубина изотермических поверхностей в центре должна уменьшаться (рис. 3).

До 2009 г. имела только спутниковая информация о кольцевых структурах на льду оз. Байкал. Первые экспериментальные исследования толщины льда, течений и вертикального распределения температуры выполнены в апреле 2009 г. на кольцевой структуре в западной части Южного Байкала. В результате экспедиционных исследований установлено, что возникновение структуры связано с генерацией антициклонического кругового течения [7]. Это подтверждено исследованиями кольцевых структур у мысов Крестовского [10, 11] и Нижнее изголовье [34, 35] и в западной части Южного Байкала [39]. В зоне усиления течений происходит ускорение разрушения ледового покрова [20]. Экспериментальные данные и моделирование [10, 11] свидетельствуют о том, что генерация антициклонического течения может быть обусловлена локальным подъемом глубинных вод и проникновением их в приповерхностную зону озера [11].

Вопрос о происхождении этих структур достаточно активно обсуждается. Существуют разные объяснения формирования кольцевых структур [2, 4, 33–35, 39]. Обсуждение разных гипотез образования кольцевых структур приведено в работе [11]. Кольцевые структуры на льду оз. Байкал с 2003 по 2020 г. появлялись 23 раза в восьми районах (рис. 6). Положение глубоководных газовых факелов [26] в основном не совпадает с кольцевыми структурами на льду. Летние локальные участки неоднородности поля температуры поверхности не всегда близки к кольцевым структурам на льду озера. Вихревые образования часто наблюдаются в морях [21, 22] и озерах [23, 32]. Их размеры иногда сопоставимы с  $R_0$ . Согласно данным, размеры кольцевых структур на льду Байкала близки к  $R_0$  [11].

В работах [10, 11] о кольцевых структурах на льду оз. Байкал авторы настоящей статьи рассматривают только структуры, появляющиеся на стадии разрушения ледового покрова (конец марта–апрель), когда последствия осенних ветровых течений незначительны [38]. В работах А.В. Кураева [34, 35] рассматриваются, кроме этого, кольцевые структуры, появляющиеся на льду при становлении ледового покрова. Эти структуры – динамического происхождения, но

причиной их образования могут быть ветровые течения.

Подледные течения после затухания ветровых представляют собой классический случай реализации геострофического равновесия (“geostrophic adjustment”). При этом не всегда можно определить, что есть причина, а что – следствие приспособления: течение или апвеллинг/даунвеллинг. На стадии нарастания льда минерализация верхнего подледного слоя воды увеличивается вследствие вымораживания солей и остается повышенной до разрушения льда [9]. Если бы причиной образования кольцевых структур были течения, то не отмечалось бы понижения минерализации и повышения температуры в центре кольцевой структуры (рис. 5), как это следует из измерений [11]. В подледный период источником более теплой воды с пониженной минерализацией может быть только глубинная зона ( $>300$  м). Поэтому авторы настоящей статьи считают, что первопричиной формирования ледовых колец в апреле служит подъем глубинных вод, приводящий к повышению температуры и заглуплению изотерм в центральной части структуры [11], что способствует возникновению и поддержанию кругового течения. При этом повышение температуры поверхностного слоя подледной воды во внутренней части кольца не сказывается на толщине льда. Понижение температуры в центре в летний период свидетельствует о подъеме “холодных” глубинных вод.

Зимой в результате локального подъема происходит проникновение глубинных вод в приповерхностную зону. В результате имеет место заглупление термоклина и генерируется антициклоническое течение [11]. Летом в результате подъема глубинных вод температура поверхности понижается, наблюдается уменьшение температуры поверхности в центре и генерируется циклоническая циркуляция (рис. 1, 2). Образование кольцевых структур на поверхности льда и возникновение локальных понижений температуры поверхности в навигационный период связаны с апвеллингами – причиной изменений температуры поверхности. Причиной локальных апвеллингов в подледный и навигационный периоды могут быть уменьшение плотности придонной воды [27] или всплывание газовых гидратов, которое наблюдалось и зимой, и летом [24].

Согласно модели, в которой использованы измеренные в апреле скорости, время существования течений, необходимых для формирования неоднородностей толщины ледового покрова, составляет 25–35 сут [11]. Время уменьшается при увеличении начальной скорости течений. Для летних локальных неоднородностей температуры поверхности время их существования несколько суток. Это согласуется с различием времени зату-

хания течений подо льдом — ~45 сут [38] и 36 ч летом [6] соответственно. Различие затухания течений связано также с тем, что скорость диссипации турбулентной энергии летом ( $(1-5) \times 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}^3$  [6]) значительно больше, чем зимой ( $(0.6-0.8) \times 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}^3$ ), в глубинной зоне [38]. В подледной зоне скорость диссипации может снижаться до  $<10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}^3$  [31]. Аномальное время существования неоднородностей вертикального распределения температуры ( $>2$  мес.) было отмечено в 2009 г. при полевых исследованиях кольцевой структуры в Западной части Южного Байкала [11]. Длительное существование антициклонической циркуляции можно объяснить неоднократной генерацией апвеллингов.

### ВЫВОДЫ

Спутниковая информация свидетельствует о появлении кольцевых структур на льду оз. Байкал, а также локальных участков понижений температуры поверхности воды в навигационный период. Исследования подтверждают, что причина их появления — апвеллинги. Локальные апвеллинги вследствие извержений метана, распределения или повышения температуры придонной воды, а также всплывания газовых гидратов могут быть причиной генерации круговых течений, способствующих уменьшению толщины ледового покрова в подледный и понижениям температуры поверхности в навигационный периоды.

Регистрация изменений температуры поверхности летом позволила предположить, что течения — следствие подъема вод. Зимние работы показали, что в районе кольцевых структур развивается антициклоническая циркуляция. Авторами установлено, что ее развитие связано с проникновением глубинных вод в приповерхностную зону. Это вызывает повышение температуры и понижение ионной составляющей минерализации верхнего слоя в центральной части кольцевой структуры. Кольцевые структуры на льду и круговые течения в навигационный период обусловлены локальными апвеллингами, которые могут быть следствием всплывания газовых гидратов или конвекции, обусловленной понижением плотности воды в придонной зоне. Все эти явления связаны с существованием газовых гидратов в толще донных отложений оз. Байкал.

Авторы благодарят Н.Ю. Могилёва и других сотрудников ИСЗФ СО РАН за подготовку и предоставление спутниковых данных.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Айнбунд М.М.* Течения и внутренний водообмен в озере Байкал. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 248 с.
2. *Балханов В.К., Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б.* Феномен образования круговых колец на заснеженном

ледовом поле озера Байкал // Журн. техн. физики. 2010. Т. 80. № 9. С. 34–37.

3. *Блинов В.В., Гранин Н.Г., Гнатовский Р.Ю., Жданов А.А., Римкус С.* Определение водных масс в озере Байкал методом Т,S-анализа // География и природ. ресурсы. 2006. № 2. С. 63–69.
4. *Бордонский Г.С., Крылов С.Д.* О природе кольцевых образований на спутниковых снимках ледяного покрова озера Байкал // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 4. С. 27–31.
5. *Верболов В.И.* Течения и водообмен в Байкале // Вод. ресурсы. 1996. Т. 23. № 4. С. 413–423.
6. *Верболов В.И., Гранин Н.Г., Жданов А.А., Левин Л.А., Шерстянкин П.П., Шимараев М.Н.* Оценка гидрофизического состояния деятельного слоя по материалам полигонных наблюдений на Байкале // Вод. ресурсы. 1992. № 5. С. 74–86.
7. *Гранин Н.Г.* Окольцованный Байкал // Наука из первых рук. 2009. № 3. С. 22–23.
8. *Гранин Н.Г., Вюшт А., Гнатовский Р.Ю., Капитанов В.В.* Свидетельства активности грязевых вулканов на Байкале // Тез. докл. Четвертой Верещагинской Байкальской конф. Иркутск: ИГ СО РАН, 2005. С. 52–53.
9. *Гранин Н.Г., Гнатовский Р.Ю., Жданов А.А., Цехановский В.В., Горбунова Л.А.* Конвекция и перемещение подо льдом озера Байкал // Сиб. экол. журн. 1999. № 6. С. 597–600.
10. *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 // Докл. РАН. 2015. Т. 461. № 3. С. 343–347.
11. *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>
12. *Домышева В.М., Шимараев М.Н., Горбунова Л.А., Голобокова Л.П., Коровякова И.В., Жданов А.А., Цехановский В.В.* Кремний в озере Байкал // География и природ. ресурсы. 1998. № 4. С. 73–81.
13. *Жданов А.А.* Горизонтальный перенос и макротурбулентный обмен в озере Байкал. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Иркутск: ИГ СО РАН, 2006. 22 с.
14. *Жданов А.А., Гнатовский Р.Ю., Гранин Н.Г., Блинов В.В., Асламов И.А., Козлов В.В.* Изменчивость подледных течений в Южном Байкале по данным 2012–2016 гг. // Вод. ресурсы. 2017. Т. 44. № 3. С. 311–321. <https://doi.org/10.7868/S032105961703018X>
15. *Жданов А.А., Гранин Н.Г., Гнатовский Р.Ю., Блинов В.В.* Горизонтальный макротурбулентный обмен и скорость диссипации турбулентной энергии в пелагиали озера Байкал // География и природ. ресурсы. 2009. № 1. С. 55–60.
16. *Жданов А.А., Гранин Н.Г., Шимараев М.Н.* Подледные течения Байкала (на основе новых экспери-



- ментальных данных) // География и природ. ресурсы. 2002. № 1. С. 79–83.
17. Кротова В.А. Геострофическая циркуляция вод Байкала в период прямой термической стратификации // Тр. Лимнол. ин-та СО АН СССР. 1970. Т. 14(34) С. 11–44.
  18. Макаров М.М., Муякшин С.И., Кучер К.И., Асламов И.А., Гнатовский Р.Ю., Гранин Н.Г. Пузырьковые выходы газа на дне озера Байкал: экологическое наблюдение и оценка потока метана, связь этого потока с высотой газовых факелов // Фундаментал. и приклад. гидрофизика. 2016. Т. 9. № 3. С. 32–41.
  19. Могилев Н.Ю., Гранин Н.Г., Гнатовский Р.Ю., Абушенко Н.А., Алтынец Д.А. Верификация алгоритмов восстановления температуры поверхности воды Байкала на основе радиометрических измерений // География и природ. ресурсы. 2001. № 2. С. 136–142.
  20. Сокольников В.М. Причины, обуславливающие образование пропарин (“ключей”) в ледяном покрове Байкала // Тр. Лимнол. ин-та СО АН СССР. 1959. Т. 17. С. 65–94.
  21. Cushman-Roisin B. Introduction to Geophysical Fluid Dynamics. New Jersey: Prentice Hall, 1994. 320 p
  22. 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. <https://doi.org/10.1029/JC087iC01p00385>
  23. Forrest A.L., Laval B.E., Pieters R., Lim D.S. A cyclonic gyre in an ice-covered lake // Limnol. Oceanogr. 2013. V. 58 (1). P. 363–375. <https://doi.org/10.4319/lo.2013.58.1.0363>
  24. Granin N.G., Aslamov I.A., Kozlov V.V., Makarov M.M., Kirillin G., McGinnis D.F., Kucher K.M., Blinov V.V., Ivanov V.G., Mizandrontsev I.B., Zhdanov A.A., Anikin A.S., Granin M.N., Gnatovsky R.Yu. Methane hydrate emergence from Lake Baikal: direct observations, modelling, and hydrate footprints in seasonal ice cover // Sci. Rep. 2019. V. 9. № Art. 19361. P. 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55758-8>
  25. 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. № 3–4. P. 399–409.
  26. 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-Mar. Let. 2012. Т. 32. № 5. P. 427–436. <https://doi.org/10.1007/s00367-012-0299-6>
  27. Granin N.G., Radziminovich N.A., Batist M., Makarov M.M., Chechelmitckiy V.V., Blinov V.V., Aslamov I.A., Gnatovsky R.Yu., Poort J., Psakhie S.G. Lake Baikal’s response to remote earthquakes: Lake-level fluctuations and near-bottom water layer temperature change // Mar. Petroleum Geol. 2018. V. 89 (3). P. 604–614. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.10.024>
  28. Hohmann R., Kipfer R., Peeters F., Piepke G., Imboden D.M., Shimaraev M.N. Processes of deep-water renewal in Lake Baikal // Limnol. and Oceanogr. 1997. V. 42 (5). P. 841–855.
  29. IOC, SCOR and IAPSO, 2010: The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission. Manuals and Guides № 56. UNESCO (English). 2010. 196 p.
  30. Jewson D.H., Granin N.G., Gnatovsky R.Yu., Lowry S.F., Teubner K. Coexistence of two *Cyclotella* diatom species in the plankton of Lake Baikal // Freshwater Biol. 2015. № 60(10). P. 2113–2126.
  31. Kirillin G., Aslamov I., Kozlov V., Zdorovenov R., Granin N. Turbulence in the stratified boundary layer under ice: observations from Lake Baikal and a new similarity model // Hydrol. Earth System Sci. 2020. V. 24. № 4. P. 1691–1708. <https://doi.org/10.5194/hess-24-1691-2020>
  32. Kirillin G.B., Forrest F.L., Graves K., Fischer A., Engelhardt C., Laval B.E. Axisymmetric circulation driven by marginal 1 heating in ice-covered lakes // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42 (8). P. 2893–2900.
  33. Kouraev A., Shimaraev M., Remy F., Ivanov A., Boris Golubov D. An interesting natural phenomenon – giant rings on Lake Baikal ice // Proc. ESA Living Planet Symposium. Bergen, 2010. V. 12. EGU2010-8453.
  34. 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 AQ9 // Limnol. Oceanogr. 2016. № 61. P. 1001–1014.
  35. 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. P. 2738–2754. <https://doi.org/10.1002/lno.11338>
  36. Shimaraev M.N., Verbolov V.I., Granin N.G., Shershtyankin P.P. Physical limnology of Lake Baikal: a review. Print № 2. Irkutsk, Okayama, 1994. 81 p.
  37. Troitskaya E., Blinov V., Ivanov V., Zhdanov A., Ruslan Gnatovsky R., Sutyryna E., Shimaraev M. Cyclonic circulation and upwelling in Lake Baikal // Aquat Sci. 2015. № 77. С. 171–182. <https://doi.org/10.1007/s00027-014-0361-8>
  38. Wuest 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. Т. 50. № 1. P. 184–196.
  39. Zyryanov V.N., Granin N.G., Zyryanov D.V., Chebanova M.K., Aslamov I.A., Gnatovsky R.Yu., Blinov V.V. Preliminary results of the summer and winter campaigns 2019–2020 on Lake Baikal in the framework of the RFBR project for the study of eddies that form ice rings // Limnol. Freshwater Biol. 2020. № 4. P. 954–955. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-954>