

Гигантские ледовые кольца на озерах Байкал и Хубсугул: перечень, структура воды в районах колец и вероятный механизм их формирования

Алексей В. Кураев^{1,2,3}, Елена А. Захарова^{1,2}, Frédérique Rémy¹, Андрей Г. Костяной^{4,5}, Михаил Н. Шимараев⁶, Nicholas M. J. Hall¹, Андрей Я. Сукнёв⁷

¹ LEGOS, Université de Toulouse, CNES, CNRS, IRD, UPS Toulouse, France, ² Государственный океанографический институт, Санкт-Петербургское отделение, Санкт-Петербург, Россия, ³ Томский Государственный университет, Геолого-географический факультет, кафедра гидрологии, Томск, Россия, ⁴ Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Москва, Россия, ⁵ Московский университет им. С.Ю.Витте, Москва, Россия, ⁶ Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия, ⁷ Большая Байкальская Тропа Бурятия (ББТ Бурятия), Улан-Удэ, Россия

Неофициальный авторский перевод с английского. Оригинальная английская версия находится в открытом доступе: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/lno.10268/pdf>.

Контакт: kouraev@legos.obs-mip.fr, www.icerings.org

Цитирование: Kouraev A.V., Zakharova E.A., Rémy F., Kostianoy A.G., Shimaraev M.N., Hall N.M.J., Suknev A.Ya., Giant ice rings on Lakes Baikal and Hovsgol: inventory, associated water structure and potential formation mechanism, *Limnology and Oceanography* 61, 2016, p. 1001-1014, doi: 10.1002/lno.10268

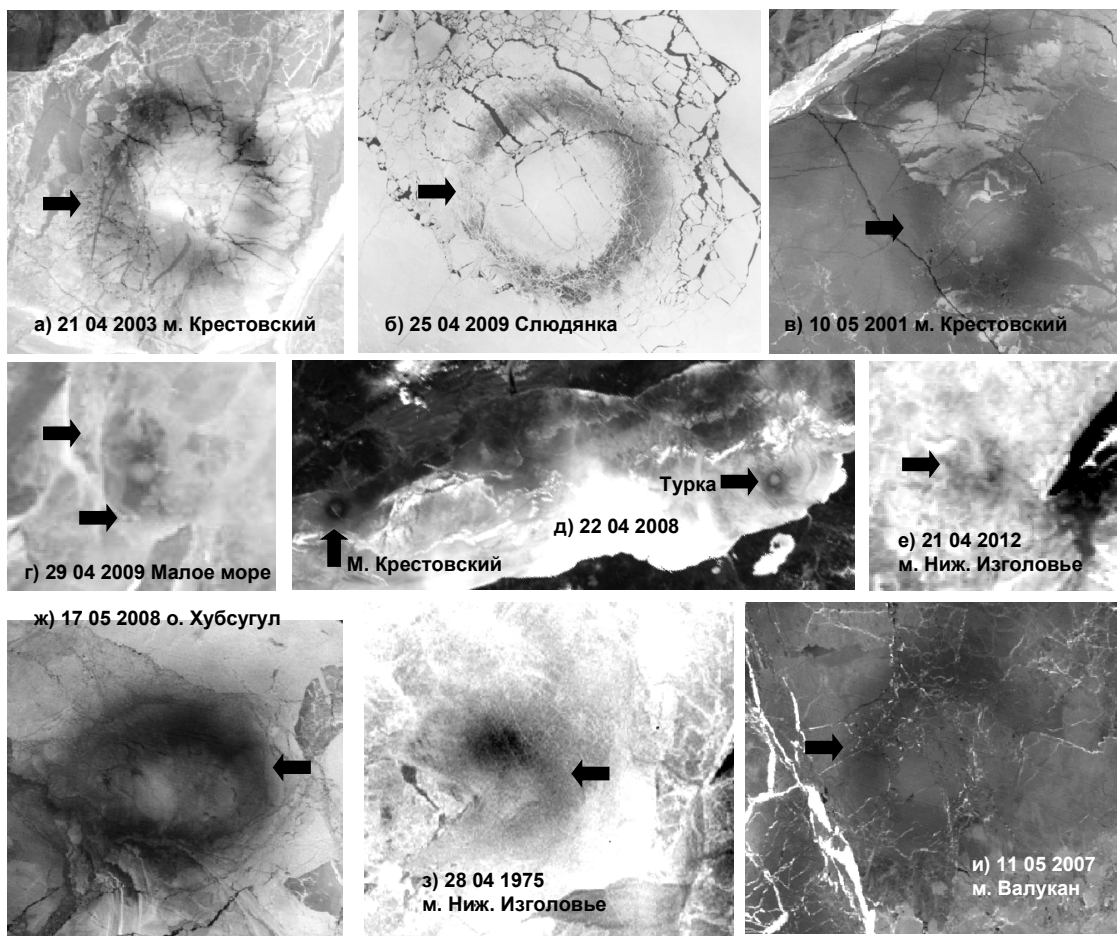


Рисунок 1. Примеры ледовых колец для озёр Байкал и Хубсугул. Данные Landsat 1-7 (а, в, ж-и), MODIS/Terra (г-е) и МКС (б). Все изображения, за исключением (е) ориентированы на север. Местоположение и параметры колец приведены на Рис. 2 и в Таблице 1.

Резюме: Наблюдения гигантских ледовых колец на озере Байкал (Россия) вызвали в последнее время научный и общественный интерес. Тем не менее, до сих пор нет чёткого понимания причины их происхождения. В статье приводится перечень ледовых колец, обнаруженных на основе спутниковых снимков и фотографий для периода 1974-2014 гг. Было обнаружено 45 колец на озере Байкал (по сравнению с 13 ранее известными), а также, впервые, четыре кольца на соседнем озере Хубсугул (Монголия). Результаты наших гидрологических исследований подо льдом в районе колец на озере Байкал в 2012-2014 годах и на озере Хубсугул в 2015 году показывают наличие (до и во время проявления ледовых колец) относительно тёплых вихрей в виде двояковыпуклых линз, расположенных точно под кольцами. Мы полагаем, что эти вихри являются причиной формирования ледовых колец в этих озерах. Мы проводим переоценку существующих гипотез формирования ледовых колец и обсуждаем возможные механизмы образования вихрей.

Начиная с 2009 года научное сообщество и широкая общественность были заинтригованы новостями о гигантских кольцах на льду озера Байкал (“Circles in thin ice” 2009; Granin 2009; Hsu 2009; “Ring-like structures” 2009; “Strange Circles...” 2009; Kouraev et al. 2007b, 2010a; “Ice rings” 2013; Granin et al. 2015). Эти кольца с тёмным (более тонким) льдом с типичным диаметром 5-7 км и шириной кольца 0.9-1.3 км (рис. 1) окружают белый лёд. Круглая форма этих колец и неясное происхождение этого природного явления представляют собой загадку и проблему для научных исследований.

Возможные объяснения происхождения ледовых колец включают в себя широкий спектр гипотез: от атмосферного воздействия и биологической активности в верхнем слое воды до НЛО и мистификаций (круги на полях и т.д.). Тем не менее, среди более научных объяснений (Granin 2009; Balkhanov et al. 2010; Kouraev et al. 2007b, 2010a; Granin et al. 2015) наиболее часто упоминается гидротермальная активность озера Байкал, а именно чрезвычайно высокая интенсивность выхода газов (метана) из донных отложений. Поскольку озеро Байкал сформировано в древнем разломе, увеличение теплового потока из озёрных отложений и температурные градиенты могут привести к интенсивному выделению газов. На мелководье метан обычно попадает в толщу воды благодаря локальным выходам и грязевым вулканам, расположенным в местах разломов на дне, создавая пропарины (небольшие участки открытой воды размером от нескольких метров до нескольких десятков метров) в ледовом покрове. Однако на больших глубинах метан может выделяться в основном из газогидратов, которые находятся на глубинах более 500 м в южной и центральной котловинах озера Байкал (Granin et al. 2010).

Как именно кольца могут образоваться после выхода газов до сих пор не очень хорошо понятно. По одной из гипотез (Granin 2009; Granin et al. 2015), основанной на данных натурных наблюдений в апреле-мае 2009 г. со льда в районе кольца вблизи южной оконечности озера Байкал (см Рис. 1b.) и численном моделировании, локальный подъём глубинных вод после выброса газа из точечного источника приводит под воздействием силы Кориолиса к образованию куполообразной структуры поля плотности воды и антициклоническому (направленному по часовой стрелке) геострофическому кольцевому течению. Другие гипотезы, связанные с выходом газа, включают в себя формирование тороидальной конвекции, приносящей к поверхности более тёплую воду (Balkhanov et al. 2010), или формирование гигантского газового пузыря под ледовым покровом, который изолирует центральную часть и в то же время увеличивает теплообмен на внешней границе пузыря (Kouraev et al., 2007b, 2010a). Другие исследователи (Bordonskiy and Krylov 2014) считают, что образование ледовых колец объясняется деформациями и неоднородностью

ледового покрова и самоорганизацией в виде кольцеобразной структуры под воздействием приходящей солнечной энергии. Однако, как будет видно в дальнейшем, все эти гипотезы носят рабочий характер и не в состоянии адекватно объяснить механизм формирования ледовых колец.

Для того, чтобы лучше понять процессы, ответственные за формирование, развитие и исчезновение ледовых колец, мы: (1) обработали архивы спутниковых снимков и фотографий, чтобы получить как можно более полный перечень ледовых колец и их параметров; (2) провели полевые гидрологические исследования (2010-2015 гг.) в районах формирования ледовых колец, что привело нас к (3) переоценке существующих гипотез о происхождении ледовых колец.

Природные условия озёр Байкал и Хубсугул

Байкал - самое глубокое озеро в мире, которое содержит 20% мировых запасов жидкой воды на поверхности Земли. Дно озера разделяется на три части (рис. 2): глубокие впадины в южной и центральной частях (максимальная глубина 1461 м и 1642 м, соответственно), и менее глубокая (максимальная глубина 904 м) в северной части. Высокогорное озеро Хубсугул (также известное как Ховсгол или Хувсгул) в северо-западной части Монголии находится в 250 км к юго-востоку от озера Байкал на высоте 1645 м над уровнем моря (на 1200 м выше, чем озеро Байкал). Оно является частью Байкальской рифтовой системы, дно озера имеет крутые уклоны (25-50 м/км) и глубины более 250 м. Континентальные климатические условия с продолжительной холодной зимой приводят каждый год к полному замерзанию Байкала в течение 5-6 месяцев (с декабря-января по май) (Verbolov et al. 1965; Galaziy 1993; Kouraev et al. 2007a, 2010b) и Хубсугула в течение 6-7 месяцев (с ноября по май-июнь). На относительно длительных временных масштабах, образование ледового покрова, его развитие и разрушение зависят от температуры воздуха, ветра, снежного покрова и т.д., а на более коротких временных масштабах - от изменений температуры льда и пространственной неоднородности теплового потока от воды ко льду.

Распределение и состояние ледового покрова и снега на льду влияет на гидрофизическую структуру вод, весеннее цветение диатомовых водорослей и первичную продукцию (Granin et al. 1999; Semovski et al. 2000; Mackay et al. 2003, 2005; Moore et al. 2009), а также на условия жизни единственного млекопитающего в озере Байкал - эндемической байкальской нерпы (*Pusa Sibirica*, *Phoca Sibirica*). Для обоих озёр лёд также имеет важное значение для транспорта на льду, рыбалки и туризма. Лёд зимой достаточно толстый (более 1 м) чтобы выдерживать мотоциклы, автомобили и даже тяжелые транспортные средства.

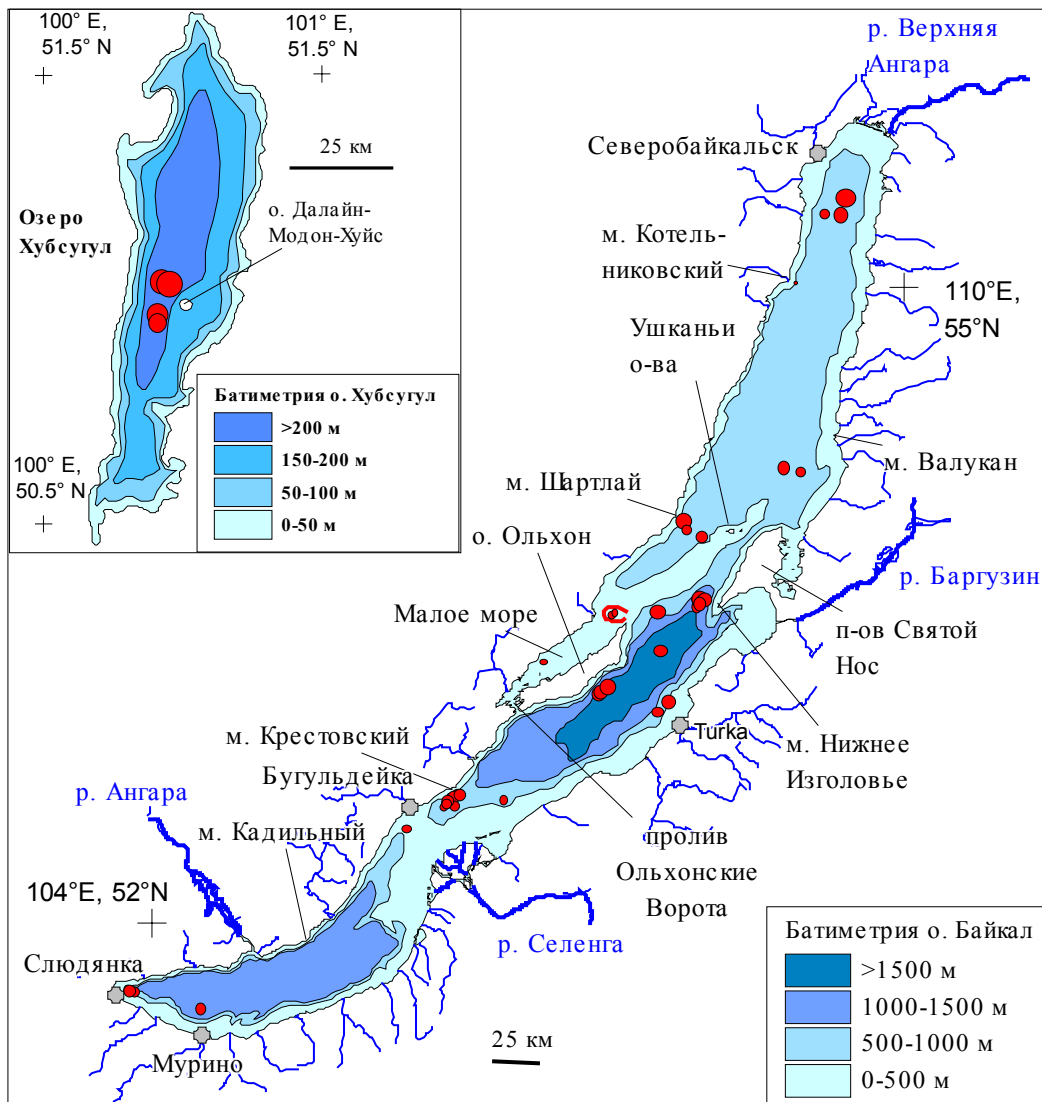


Рис. 2. Карта озёр Байкал и Хубсугул. Показаны батиметрия (м), расположение и размер ледовых колец (красные круги). Масштаб различен для двух озёр и указан на картах.

Изменения температуры воздуха приводят к сжатию или расширению льда и образованию станových щелей. При движении по льду становые щели относительно легко обнаружить (трещины, связанные с термическим расширением льда, видны как области торосов, а связанные со сжатием льда - как трещины с открытой водой), толщина льда здесь сравнима с соседними участками (за исключением в непосредственной близости от становой щели). Ледовые кольца, наоборот, не так легко заметны при передвижении по льду, по крайней мере, не в заключительной стадии развития ледовых колец. Ледовой покров здесь имеет тот же вид, что и в прилегающих районах, но лёд гораздо тоньше.

В связи с этим, раннее обнаружение и прогноз возможного местоположения, размера и свойств зон с тонким ледовым покровом, связанных с ледовыми кольцами, имеет первостепенное значение для обеспечения безопасности передвижения и рыболовства на льду озера зимой и весной.

Детекция и перечень ледовых колец

Детекция ледовых колец

Мы обработали и провели визуальную интерпретацию спутниковых снимков в видимом и инфракрасном диапазонах со спутников MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer 2002–2015) (Irkutsk RICC website 2015; LAADS web site 2015), Landsat (1972–2015) (Earth Explorer web site 2015) и NOAA AVHRR (для мыса Крестовский весной 1999 года, пространственное разрешение 1 км). Сканер MODIS на борту спутников Terra и Aqua, (ежедневные наблюдения с 2002 года) обеспечивает снимки (пространственное разрешение до 250 м в видимом диапазоне), полностью покрывающие озеро Байкал. Снимки Landsat (пространственное разрешение зависит от типа сканера: 80 м для MSS, 30 м для TM и 15 м для ETM+ и OLI) позволяют улучшить анализ ледовых полей благодаря более высокому пространственному разрешению и наличию снимков с начала 1970-х гг. Размер снимка Landsat составляет около 185 на 185 км, период повторяемости пролёта - 16 дней (18 дней для MSS), поэтому были проанализированы все доступные

сцены для периода 1972-2015 из различных орбит, охватывающих озеро Байкал (10 сцен для треков 131-134 для каждого орбитального цикла) и Хубсугул (4 сцены для треков 136-137 для каждого орбитального цикла). MODIS и Landsat имеют солнечно-синхронные орбиты, пролетая над одним и тем же местом в то же самое местное время (около 3 или 4 ч UTC для озера Байкал, что соответствует местному позднему утру: GMT+8 ч). Мы также проанализировали фотографии (с различным пространственным разрешением и временным охватом, за период 1983-2009 гг.), сделанные с Международной Космической Станции (МКС) и с американского космического корабля многоразового использования Шаттл (Evans et al. 1992; Circles in Thin Ice 2009; The Gateway to Astronaut Photography of Earth 2013).

Мы определяем "ледовое кольцо" как круговую (или близкую к ней) структуру, которая видна как тёмное кольцо на ледовом покрове, с диаметром в несколько километров. После того, как кольца были идентифицированы с помощью визуального анализа, были определены географические координаты и диаметр колец, а также проведена классификация их формы. Существует несколько возможных

проявлений колец на льду озера. В зависимости от структуры льда (и, вероятно, также от снежного покрова на льду) это может быть полное (рис. 1a) или открытое кольцо (рис. 1f). В некоторых случаях наблюдается более выраженная тёмная структура в определённой части кольца, что делает его похожим на кольцо с бриллиантом или с тёмной структурой (рис. 1h). В других случаях кольцо может быть окружено гало с гораздо большим диаметром (рис. 1d или рис. 3 в период с 6 по 29 апреля 2009 г.).

После того, как ледовое кольцо становится видимым на спутниковом снимке, эта структура сохраняется до разрушения ледового покрова. Последовательность спутниковых изображений для района мыса Нижнее Изголовье (рис. 3) показывает типичный пример возникновения и развития ледового кольца в 2009 году. Стабильный ледовый покров сформировался к 13 января. Первое наблюдение ледового кольца было 2 недели спустя - 31 января - когда лёд был ещё тонкий. В дальнейшем кольцо постепенно становилось все более и более заметным. К середине апреля кольцо (тёмное и широкое) было хорошо сформировано. К 19-20 апреля кольцо разделилось на две части, а лёд в кольце постепенно разрушался до полного исчезновения льда (3-4 мая).

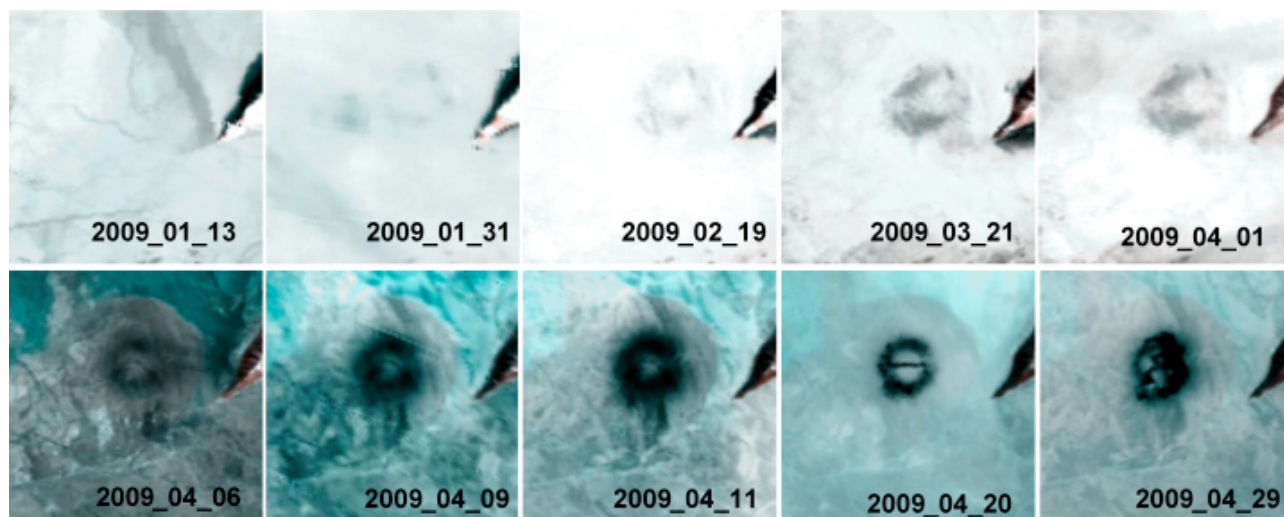


Рисунок 3. Хронологическая последовательность снимков MODIS, показывающих формирование, развитие и исчезновение ледового кольца (диаметр 6.6 км) в районе мыса Нижнее Изголовье (Средний Байкал) в январе-апреле 2009 года.

Поскольку кольца до сих пор ни разу не наблюдались ни в ноябре, ни в декабре, мы называем каждую зиму как год, в котором зима заканчивается (например, 2010 г. для зимы 2009/2010 гг.). Для привязки ледовых колец мы использовали название ближайшего населенного пункта или географического объекта (мысы, острова и т.д.).

Время жизни кольца определялось как разница (в днях) между его первым безоблачным наблюдением и последним (как правило, перед разрушением ледового покрова озера, который наступал один или несколько дней спустя). Когда ледовое кольцо было ещё видно среди дрейфующих ледовых полей во время ледохода, считалось, что ледовое кольцо ещё существует.

Облачный покров часто мешает обнаружению ледовых колец на спутниковых снимках. Хотя наличие облачности изменяется от одной зимы к другой, мы сделали оценку частоты встречаемости облаков для района мыса Нижнее Изголовье, где ледовое кольцо наблюдалось в течение длительного времени в 2009 г. За весь период наличия ледового покрова (128 дней с 4 января по 11 мая) облака полностью покрывали область ледового кольца на 47 ежедневных снимках (37%), а за период наблюдения кольца (92 дня, с 1 февраля по 3 мая) облака наблюдались на 35 снимках (38%). Ошибка в определении даты появления и исчезновения ледового кольца в 2009 г. равна нулю (безоблачные изображения доступны как накануне, так и на

следующий день для обоих событий). Для других колец, наблюдаемых на снимках MODIS, неопределенность в определении дат колеблется в основном от 0 до 3-4 дней.

Перечень ледовых колец

Размер ледовых колец делает невозможным их наблюдение со льда или с берега. Поэтому спутниковые изображения являются уникальным инструментом для их идентификации и мониторинга на больших пространственных масштабах. Существующие публикации (“Circles in thin ice.” 2009; Granin 2009; Hsu 2009; “Ring-like structures” 2009; “Strange Circles...” 2009; “Ice rings.” 2013; Granin et al. 2015) упоминают в общей сложности 13 колец (таблица 1) для озера Байкал, в основном определённые на основе снимков MODIS. Насколько нам известно, до сих пор ледовые кольца не наблюдались за пределами озера Байкал.

Мы смогли идентифицировать 45 ледовых колец (включая упомянутые выше) для озера Байкал за период 1974-2014. Мы также проанализировали многочисленные крупные водоемы (озёра и водохранилища) в Евразии и Северной Америке и впервые нашли четыре ледовые кольца на озере Хубсугул (таблица 1, рис. 2). Наблюдение ледовых колец для озера Хубсугул очень важно, так как это показывает, что это явление не ограничивается озером Байкал и что могут быть схожие физические явления, приводящие к образованию ледовых колец и в других водоёмах.

Наш перечень показывает, что ледовые кольца наблюдаются также в районах с меньшей глубиной, чем глубины залегания газовых гидратов (например, в Малом море для озера Байкал - 300-400 м или на озере Хубсугул - 200-250 м) или в районах где нет известных газовых источников. Это исключает выход газов как универсальное объяснение образования ледовых колец.

Благодаря более высокой частоте наблюдений (каждый день для MODIS, в то время, как для Landsat каждые 18 или 16 дней) наибольшее количество колец было идентифицировано после 2002 года (начало работы сканера MODIS). Кроме того, во многих случаях не все снимки Landsat доступны в архиве. Таким образом, до зимы 2002/2003 много ледовых колец, вероятно, до сих пор не идентифицировано, а те, которые определены, часто наблюдались только на одном снимке за зиму (но, по-видимому, они существовали дольше чем один день). В результате мы не можем делать какие-либо выводы о временной эволюции (межгодовой изменчивости) частоты встречаемости ледовых колец, и данные о встречаемости до и после зимы 2002/2003 следует рассматривать отдельно. Есть также случаи (например, вся зима 2005/2006), когда, несмотря на наличие ежедневных снимков MODIS и умеренного наличия облачности, ледовые кольца не наблюдались. Для оценки неопределенности, связанной с определением даты появления и исчезновения колец, когда были доступны ежедневные снимки MODIS (озеро Байкал, начиная с зимы 2002/2003), мы

приводим количество дней между датой последнего снимка без кольца и датой первого наблюдения кольца, а также количество дней между датой последнего наблюдения кольца и датой первого снимка без кольца (для обоих параметров медианное значение составляет 3 дня).

Рис. 2 показывает, что ледовые кольца наблюдались во всех частях озера Байкал от его южной до северной части. Районы с наибольшим количеством ледовых колец - мыс Крестовский (12 наблюдений, положение центра кольца изменяется на 4-6 км в разные годы) и мыс Нижнее Изголовье (7 наблюдений, изменения в положении центра кольца менее 3 км) (см рис. 2). В 2009 году кольцо вблизи мыса Нижнее Изголовье наблюдалось в течение долгого времени (92 дня, см. Рис. 3). Для озера Хубсугул ледовые кольца наблюдаются вблизи острова Далайн-Модон-Хуйс в середине озера (дважды к северо-западу и дважды к юго-западу от острова, с расстоянием между ними около 8 км). Самые ранние наблюдаемые ледовые кольца для обоих озер датируются 1974 и 1975 годами, так что, хотя ледовые кольца стали обсуждаться сравнительно недавно, этот феномен проявлялся намного раньше.

Продолжительность наблюдения ледовых колец в нашем перечне изменяется от 1 дня (в зависимости от наличия спутниковых изображений и/или облачности) до 126 дней; типичная продолжительность составляет 5-10 дней. Чаще всего ледовые кольца наблюдаются во второй половине апреля (когда снежный покров отсутствует или минимален) перед разрушением льда, но они наблюдались и раньше (31 января) и позже (26 мая).

Перечень, представленный в Таблице 1, представляет собой наиболее полные данные о местонахождении, размерах, сроках появления и исчезновения и других параметрах ледовых колец в озёрах Байкал и Хубсугул. Тем не менее, этот перечень не исчерпывающий, и дальнейшее изучение архивов с таких спутников как SPOT, NOAA AVHRR и др. возможно даст новые данные об этом явлении.

Гидрологическая структура воды в районах ледовых колец

От наблюдений колец к охоте за кольцами: полевые исследования

Для того, чтобы получить лучшее представление о процессах, ответственных за формирование, развитие и исчезновение ледовых колец, мы провели специальные полевые измерения в тех регионах, где ледовые кольца наблюдались ранее. В рамках франко-российско-монгольского сотрудничества, каждую весну (март-апрель) с 2010 года, мы проводим ежегодные полевые наблюдения ледового покрова в центральной части озера Байкал, а с 2014 года - на озере Хубсугул. Измерения включают в себя замеры толщины льда и высоты снежного покрова (с помощью ручного ледобура и линейки), а также структуры льда и его шероховатости.

Таблица 1. Перечень ледовых колец и их характеристики.

| Зима | Название | Диаметр, км | Долго- та | Широ- та | Первое обнару- жение ^a | Последн ее обнару- жение ^a | Длитель- ность, дни ^b | Глубина, м | Форма ^c |
|-------------|----------------------|----------------|--------------|-------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------|--------------------|
| 1974 | м. Шартлай | 8.2 | 108.25 | 53.90 | 03/01 | 03/01 | (1) | 850 | R |
| 1974 | м. Котельниковский | 2.4 | 109.14 | 55.02 | 03/01 | 03/01 | (1) | 850 | DR |
| 1975 | м. Ниж. Изголовье | 5.4 | 108.36 | 53.50 | 04/28 | 04/28 | (1) | 1550 | DR |
| 1975 | Хубсугул | 5 | 100.40 | 50.97 | 05/19 | 05/20 | (2) | >200 | R |
| 1977 | м. Крестовский | 5.6 | 106.42 | 52.55 | 05/06 | 05/06 | (1) | 1050 | DR |
| 1985 | м. Ниж. Изголовье | 7 | 108.42 | 53.52 | 04/29 | 05/06 | (1) ^d | 1450 | OR |
| 1994 | м. Ниж. Изголовье | 6 | 108.38 | 53.51 | 04/10 | 04/16 | (7) | 1450 | OR |
| 1999 | м. Крестовский | 6.4 | 106.42 | 52.60 | 04/18 | 04/18 | (1) | 900 | R |
| 2000 | Слюдянка | 5.6 | 103.83 | 51.68 | 04/27 | 04/27 | (1) | 750 | R |
| 2000 | Северобайкальск | 5.4 | 109.37 | 55.35 | 05/15 | 05/15 | (1) | 750 | R |
| 2001 | м. Крестовский | 4.4 | 106.34 | 52.55 | 04/21 | 05/10 | (20) | 850 | DR |
| 2002 | Мал. Море (север) | 7.6 | 107.70 | 53.46 | 04/19 | 04/26 | (8) | 400 | E |
| 2002 | Мал. Море (юг) | 3.4 | 107.14 | 53.24 | 04/19 | 04/26 | (8) | 60 | R |
| 2002 | Ольхон (восток) | 7.6 | 107.58 | 53.09 | 04/26 | 04/26 | (1) | 1550 | R |
| 2003 | м. Крестовский | 5.2 | 106.45 | 52.60 | 04/03(4) | 04/28(4) | 26 | 950 | R |
| 2003 | около м. Крестовский | 4.4 | 106.81 | 52.58 | 04/17(7) | 05/08(1) | 22 | 950 | R |
| 2003 | Хубсугул | 5.8 | 100.42 | 51.04 | 06/13 | 06/13 | (1) | >200 | R |
| 2004 | м. Крестовский | 6 | 106.42 | 52.59 | 04/21(5) | 05/02(3) | 12 | 900 | R |
| 2005 | м. Крестовский | 5.6 | 106.45 | 52.61 | 04/15(1) | 05/01(3) | 17 | 900 | R |
| 2005 | Мал. Море (север) | 4.6 | 107.68 | 53.46 | 05/01(3) | 05/13(2) | 13 | 370 | R,H |
| 2005 | Ольхон (восток) | 7 | 108.07 | 53.29 | 05/13(5) | 05/23(1) | 11 | 1550 | OR |
| 2005 | о-ва Ушканьи | 6.4 | 108.40 | 53.83 | 05/21(4) | 05/23(4) | 3 | 650 | R |
| 2007 | Мурино | 6 | 104.40 | 51.60 | 04/11(2) | 04/24(2) | 14 | 1150 | R |
| 2007 | м. Валукан | 5.4 | 109.01 | 54.16 | 05/11(5) | 05/16(1) | 6 | 770 | R |
| 2008 | Хубсугул | 4.4 | 100.40 | 50.95 | 05/17 | 06/02 | 17 | >200 | OR |
| 2008 | Турка | 4.6 | 108.04 | 53.00 | 04/15(5) | 04/22(11) | 8 | 670 | R |
| 2008 | м. Крестовский | 5.4 | 106.39 | 52.59 | 04/10(2) | 04/23(10) | 14 | 850 | R |
| 2008 | Слюдянка | 4.4 | 103.81 | 51.69 | 04/16(1) | 04/30(3) | 15 | 650 | R |
| 2009 | м. Ниж. Изголовье | 6.6 | 108.37 | 53.53 | 02/01(5) | 05/03(1) | 92 | 1350 | R |
| 2009 | Слюдянка | 5.2 | 103.88 | 51.67 | 04/04(3) | 04/27(2) | 24 | 1050 | R |
| 2009 | Мал. Море (север) | 3.8 | 107.70 | 53.47 | 04/04(3) | 05/04(2) | 31 | 370 | R,H |
| 2009 | Турка | 7.6 | 108.13 | 53.05 | 04/09(2) | 04/29(4) | 21 | 500 | R,H |
| 2010 | Северобайкальск С | 7.6 | 109.55 | 55.42 | 01/31(9) | 04/27(2) | 87 | 750 | R |
| 2010 | Северобайкальск Ю | 6 | 109.50 | 55.34 | 01/02(0) | 05/07(4) | 126 | 750 | R |
| 2010 | м. Крестовский | 4.6 | 106.35 | 52.57 | 04/21(2) | 05/11(6) | 21 | 950 | R,H |
| 2010 | Бугульдейка | 4.8 | 106.04 | 52.45 | 04/21(2) | 05/16(1) | 26 | 450 | R,H |
| 2011 | м. Ниж. Изголовье | 8 | 108.38 | 53.53 | 04/15(2) | 05/02(3) | 18 | 1150 | R |
| 2011 | Ольхон (восток) | 8 | 107.64 | 53.12 | 04/13(3) | 04/26(5) | 14 | 1350 | R |
| 2011 | м. Крестовский | 6.2 | 106.36 | 52.57 | 03/31(4) | 04/27(4) | 28 | 850 | R |
| 2012 | м. Ниж. Изголовье | 6 | 108.39 | 53.52 | 04/06(3) | 04/28(1) | 23 | 1450 | R |
| 2012 | Ольхон (восток) | 7.6 | 107.59 | 53.09 | 04/06(11) | 04/21(3) | 16 | 1550 | R |
| 2012 | м. Крестовский | 6.8 | 106.37 | 52.58 | 04/06(7) | 04/21(3) | 16 | 850 | R |
| 2013 | м. Крестовский | 4.8 | 106.36 | 52.56 | 04/18(2) | 05/04(2) | 17 | 900 | R,H |
| 2013 | Св. Нос - Ольхон | 7.6 | 108.04 | 53.47 | 04/29(5) | 05/13(2) | 15 | 750 | R |
| 2013 | м. Шартлай | 5.4 | 108.27 | 53.85 | 05/07(3) | 05/19(2) | 13 | 850 | OR |
| 2014 | м. Крестовский | 6 | 106.47 | 52.61 | 04/17(1) | 04/22(4) | 9 | 850 | DR |
| 2014 | м. Ниж. Изголовье | 7 | 108.38 | 53.50 | 04/01(2) | 04/23(3) | 23 | 1450 | R |
| 2015 | м. Валукан | 5.6 | 109.18 | 54.13 | 05/08(1) | 05/10(3) | 3 | 650 | OR |
| 2015 | Хубсугул | 6.2 | 100.45 | 51.03 | 05/20 | 05/29 | (10) | >200 | OR |

Ниж. Изголовье - Нижнее Изголовье, Мал. Море - Малое Море, Св. Нос - п-ов Святой Нос. Кольца, которые упоминались в предшествующих публикациях, выделены жирным шрифтом.

^a Формат месяц/день; цифры в скобках - количество дней между последним снимком без кольца и первым обнаружением кольца, а также между последним обнаружением кольца и первым снимком без кольца, ^b длительность определялась как разница между первым и последним наблюдением кольца. Для снимков со спутников кроме MODIS, длительность даётся в скобках, что значит "по крайней мере N дней", хотя кольцо могло существовать дольше; ^c R - кольцо (ring), DR - кольцо с бриллиантом (diamond ring), OR - открытое кольцо (open ring), H - гало (halo), E - эллипс (ellipse); ^d точная дата снимка, сделанного во время полёта Shuttle STS 51B (29 апреля - 6 мая 1985) неизвестна.

С 2012 г. с использованием STD зонда YSI CASTAWAY, эти наблюдения были дополнены измерениями вертикальных профилей температуры (с точностью 0.05°C и разрешением 0.01°C) и электропроводности (с точностью $0.25\% \pm 5$ мкСм/см и разрешением 1 мкСм/см) на глубинах до 100 м (предел работы зонда). Начиная с 2014 года, мы также проводили оценки течений путем определения направления и силы течения (слабое, умеренное или сильное) по углу наклона троса с зондом STD. Существующий набор данных содержит более 250 станций, расположенных вдоль треков радарных альтиметрических спутников (Kougaev et al. 2015), а также в районах, где ранее наблюдались кольца и в других районах с интересными гидрологическими особенностями.

Для района мыса Нижнее Изголовье мы выполняли продольный разрез в местах, где кольца наблюдались в предыдущие года. Для других регионов, где наблюдались ледовые кольца - мы делали, по крайней мере, одну или несколько станций. Зима 2013/2014 гг была теплее, чем обычно, лёд был тоньше, и уже 1 апреля 2014 года до начала полевых работ ледовое кольцо было четко идентифицировано на снимке MODIS. Зная точное местоположение кольца, мы смогли два дня спустя (3-4 апреля 2014 г.) выполнить измерения с большим пространственным разрешением.

Структура воды и характеристики ледового покрова в районах ледовых колец

В нашем распоряжении теперь имеются данные четырех съёмок, проведённых в районах, где наблюдаются ледовые кольца (таблица 2). Для района мыса Нижнее Изголовье (в 2012 и 2014 гг.) измерения осуществлялись в то время, когда ледовое кольцо было уже видно на спутниковых снимках. Эти данные являются наиболее подробными и каждая съёмка состояла из измерений вдоль двух разрезов через кольцевые структуры (рис. 4). Наблюдения в 2013 году (мыс Шартлай, озеро Байкал) и 2015 году (озеро Хубсугул) (рис. 5) менее подробны, но, тем не менее, дают представление о структуре воды за 20-35 дней до появления ледовых колец.

Все гидрологические разрезы (рис. 4, 5) показывают наличие линзовидной структуры (двояково-выпуклой формы) полей температуры, удельной электропроводности и плотности воды. Эти линзовидные структуры располагаются на глубинах (определены как положение невозмущенной изопикнической поверхности) 45-55 м для озера Байкал и 30 м для озера Хубсугул со значениями плотности $1000.15-1000.225$ кг/м³ (таблица 2) и совпадают в пространстве с положением ледовых колец на поверхности озера. Ядро линзовидных структур имеет довольно равномерные значения температуры ($1-1.4^{\circ}\text{C}$, что для глубин 0-30 м на $0.1-0.6^{\circ}\text{C}$ теплее и для глубин 80-90 м на $0.4-1.3^{\circ}\text{C}$ холоднее, чем окружающая вода) и удельной электропроводности (119.5-121.5 мкСм/см для озера Байкал и 263-265 мкСм/см для озера Хубсугул). Для озера Хубсугул поле удельной электропроводности

показывает более сложное распределение, чем для озера Байкал, что указывает на возможную боковую интрузию более минерализованной ($264-266$ мкСм/см) воды на глубинах 30-50 м, хотя данных для обоснованного заключения недостаточно. Сравнение структуры воды внутри и вне кольца показывает, что в районе линзовидной структуры прогиб изолиний вверх и вниз приводит к появлению более тёплой ($+0.1-0.6^{\circ}\text{C}$) и более минерализованной ($0.4-1$ мкСм / см) воды в верхних 30 м подо льдом, и более холодной (от -1.3 до -0.4°C) и менее минерализованной (-1 мкСм/см) воды на глубинах 80-90 м.

Такая трёхмерная пространственная структура температуры, удельной электропроводности и плотности характерна для океанических антициклонических линзовидных (или внутритермоклинных) вихрей (Dugan et al. 1982; Armi and Zenk 1984; McWilliams 1985; Kostianoy and Belkin 1989). Вихри в покрытых льдом озерах наблюдались ранее. Forrest и др. (2013) наблюдали циклонический вихрь в покрытом льдом озере Павилион в Британской Колумбии, Канада (максимальная глубина 61 м), которое имеет морфологическую структуру, похожую на озеро Байкал: длинная узкая форма с тремя бассейнами, разделенными узкими порогами. В феврале 2008 года с помощью автономного подводного аппарата они наблюдали цилиндрическую аномалию плотности воды с радиусом около 110 м, которая распространялась до глубины до 14 м. Авторы отмечают, что этот радиус меньше, чем внутренний радиус деформации Россби (200 м), и предполагают, что это является результатом циклострофического баланса между центробежной силой, силой Кориолиса и силой давления. Циклоническая циркуляция привела к двояково-вогнутой структуре (в противоположность той, которая наблюдается в озерах Байкал и Хубсугул), т.е. углублением изолиний в верхних слоях (холодная и более минерализованная вода по сравнению с окружающей водой) и повышение изолиний в нижней части (более тёплая и менее минерализованная вода).

В северной части озера Килписъярви, Финляндия (средняя глубина 19.5 м, максимальная глубина 57 м), в 2013 и 2014 аномалии горизонтальной плотности воды подо льдом наблюдались как вертикально спаренные циклонический и антициклонический вихри (Graves 2015; Kirillin et al. 2015). В 2013 году они привели к появлению тёплой аномалии с радиусом 350 м и толщиной 22 м в центральной части озера. Авторы выдвигают гипотезу, что эта аномалия связана с более тёплой и более плотной водой, стекающей по склону дна и сходящейся в центре озера и ведущей к подъёму тёплой воды. Внутренний радиус деформации Россби, по их оценкам, гораздо меньше (около 160 м) и авторы предполагают, что тёплая аномалия была затронута вращением Земли и находилась либо в геострофическом, либо в циклострофическом балансе.

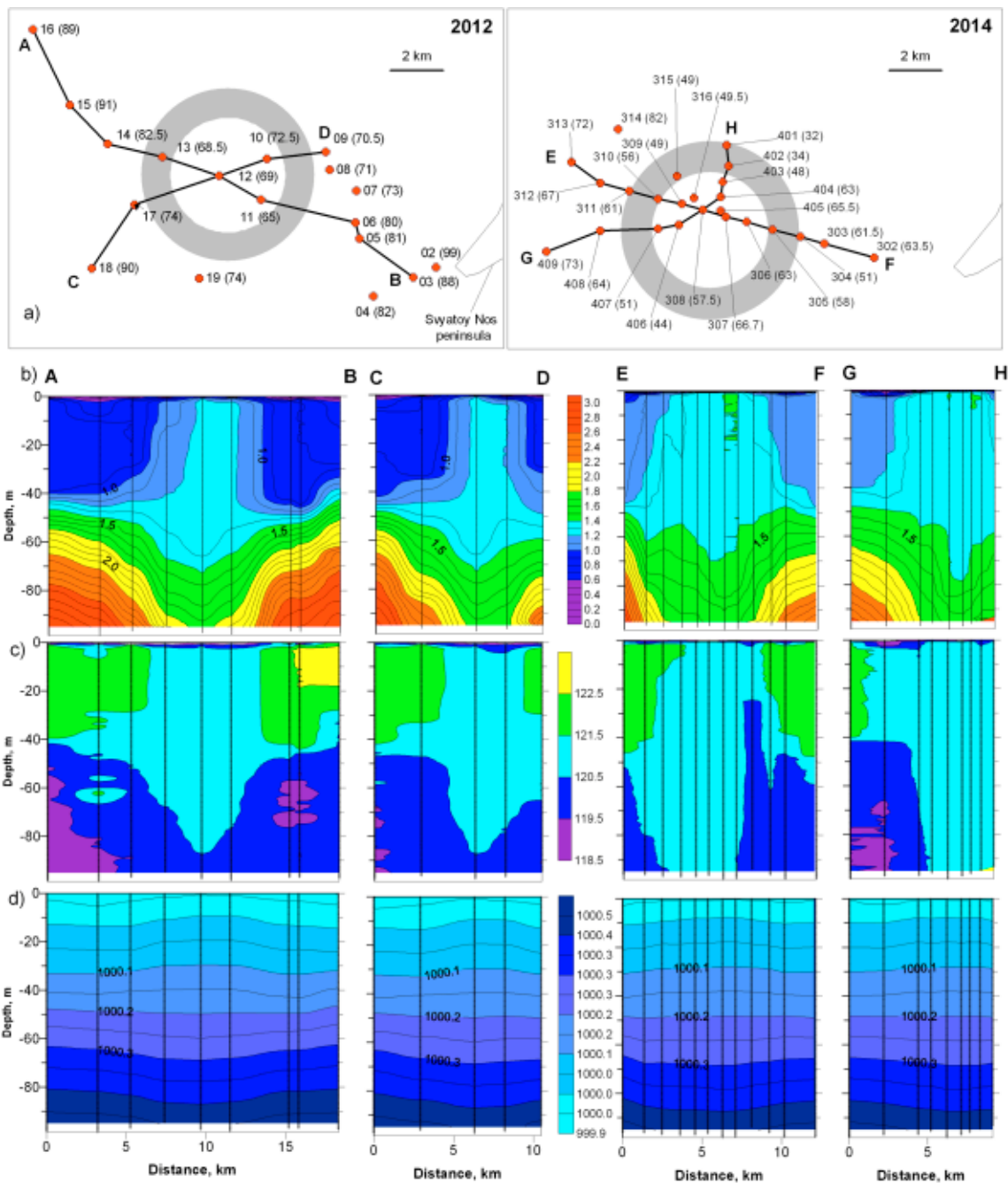


Рисунок 4. Гидрологические измерения 6 апреля 2012 г. (разрезы А-В и С-Д, левая часть) и 3 и 4 апреля 2014 года (разрезы Е-Ф и G-Н, правая часть) в районе мыса Нижнее Изголовье, озеро Байкал. (а) карты станций с их номерами (для 2014 г. первая цифра обозначает день - 3 или 4 апреля, а следующие две цифры - номер станции), толщина льда (см, в скобках), разрезы (черные линии) и расположение ледовых колец (по спутниковым снимкам 21 апреля 2012 года и 24 апреля 2014 года показано серым цветом). Depth, m - глубина, m, distance, km - расстояние, км. Вертикальные разрезы (b) температуры воды ($^{\circ}\text{C}$), (c) удельной электропроводности ($\mu\text{C}/\text{cm}$) и (d) плотности (kg/m^3 , TEOS-10-10) вдоль разрезов (вертикальные линии - положение станций). Все горизонтальные расстояния даны в одном масштабе.

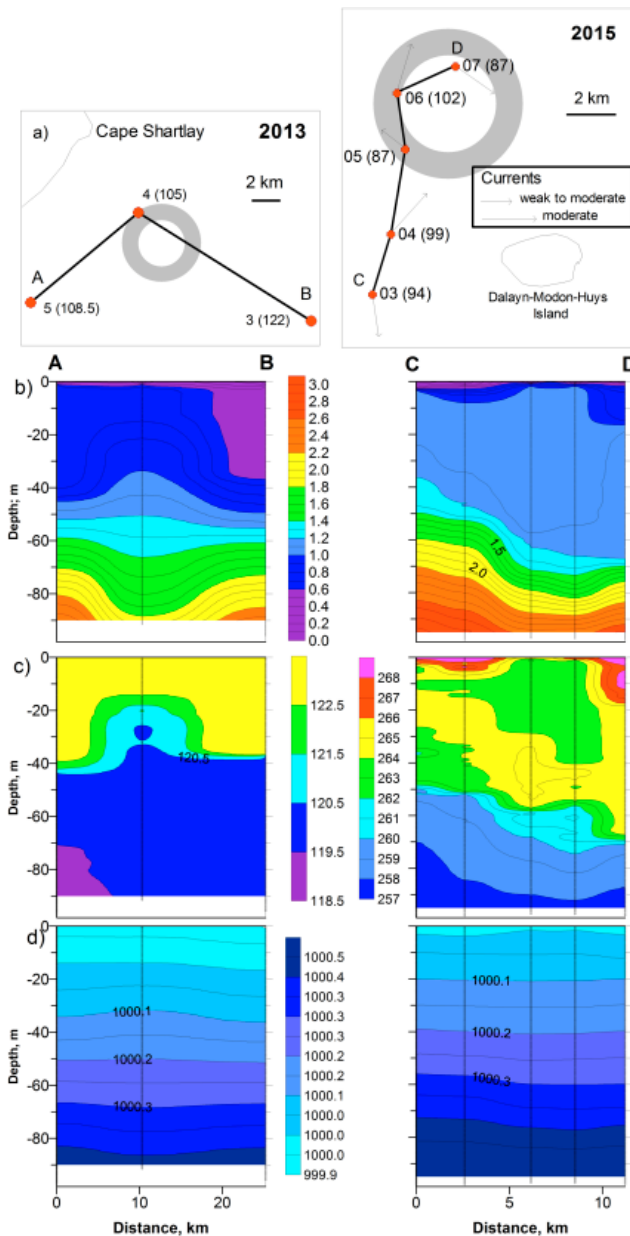


Рисунок 5. То же, что и на рис. 4, но гидрологические измерения 4 апреля 2013 года (озеро Байкал, мыс Шартлай, левая часть) и 31 марта 2015 года (озеро Хубсугул, правая часть). Для озера Хубсугул карта станций также показывает направление и скорость течений (weak to moderate - от слабых до умеренных, moderate - умеренные). Положение колец определено по снимкам 5 мая 2013 года (мыс Шартлай) и 21 мая 2015 г. (озеро Хубсугул). Горизонтальные масштабы различны для каждого озера.

Наши наблюдения в озере Байкал в 2012 и 2014 гг. показывают структуру воды, сходную с той, которая была измерена под ледовым кольцом в 2009 году (Granin et al. 2015) для поля температуры (значения в ядре вихря 1-1.25 °C). Однако для удельной электропроводности/минерализации это сходство лишь частично. Гранин и др. (2015) обнаружили менее минерализованную воду подо льдом в центре кольца по сравнению с его периферией (это совпадает с нашими наблюдениями), но начиная с глубины 40 м и ниже их наблюдения не показывают увеличения минерализации. Это наблюдение, очевидно, привело

авторов к выводу, что эта аномальная структура является результатом подъема глубинных вод (с более низкой минерализацией и высокой температурой) через термоклин, и потенциально связана с наличием газовых гидратов в донных отложениях. Тем не менее, наши данные по удельной электропроводности для всех четырех съёмок (рис. 4, 5) не показывают такой картины; вода в центре вихря всегда имеет более высокую минерализацию, чем вода на большей глубине, и мы наблюдаем распространение как вверх, так и вниз (так же, как и для температуры воды) воды с удельной электропроводностью, характерной для ядра вихря. Хорошо развитый вихрь (например, в 2014 г., рис. 4, правая часть) может показать однородную минерализацию в верхних 100 м в центральной части вихря. Мы полагаем, что это менее минерализованная вода, распространяющаяся вверх и вниз от невозмущенного изопикнического слоя в результате вихревого движения, а не вода, поступающая из более глубоких слоёв. Это, а также тот факт, что кольца наблюдались на относительно небольших глубинах и в районах без известных источников газа (см раздел "Детекция и перечень ледовых колец") противоречат упомянутым во Введении гипотезам формирования ледовых колец, связанным с выходами газа.

Наши наблюдения структуры воды для различных разрезов вдоль кольцевых структур в 2012 и 2014 гг. имеют очень схожую структуру, показывая, что наблюдаемые линзовидные вихри имеют изолированную круглую форму и обладают радиальной симметрией. Наблюдаемая аномальная структура воды как до (в 2013 и 2015 гг.) так и во время (в 2012 и 2014 гг.) проявления ледовых колец показывает, что такие линзовидные структуры непосредственно связаны с ледовыми кольцами, что они существуют до и продолжают существовать во время появления и развития ледового кольца, и что ледовое кольцо представляет собой поверхностное проявление динамических процессов, связанных с подледными линзовидными вихрями. Это противоречит гипотезе образования ледовых колец, связанной с неоднородностями структуры льда (Bordonskiy and Krylov 2014).

В зависимости от особенностей формирования льда в начале зимы, его дрейфа, деформации и последующего роста, толщина льда пространственно неоднородна и таяние льда, связанное с динамическими процессами, происходящими подо льдом, приводит к разной скорости таяния льда и, таким образом, разной толщине льда. Это также может быть проиллюстрировано различными проявлениями ледовых колец (такие как открытые кольца, кольца с бриллиантами и т.д., см таблицу 1), связанные с различными типами ледовых полей в районах формирования ледовых колец. Измерения толщины льда в районе ледового кольца в Южном Байкале в 2009 году (Granin 2009; Granin et al. 2015) показывают наличие более толстого льда в центре кольца (74 см) и за его пределами (70 см), и более тонкого льда (43 см) в самом кольце. Наши данные для 2013 и 2015 гг. (рис. 5), представляющие ситуацию за 20-35 дней до появления колец, слишком редки, чтобы сделать однозначные выводы

относительно пространственного распределения толщины льда внутри и вне ледовых колец. Однако наши наблюдения (рис. 4) в 2012 г. (когда кольцо было слабо видно) и особенно в 2014 г. (когда кольцо

было хорошо видно) дают хорошее представление о пространственном распределении толщины льда.

Таблица 2. Параметры структуры воды и свойства ледового покрова для ледовых колец в 2012-2015 гг.

| Год | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| Район | м. Нижнее Изголовье | м. Шартлай | м. Нижнее Изголовье | Хубсугул |
| дата измерений CTD | 6 апреля | 4 апреля | 3-4 апреля | 31 марта |
| Первое наблюдение кольца | 6 апреля | 7 мая | 1 апреля | 20 мая |
| Глубина термоклина вне кольца, м | 40-45 | 35-40 | 40-45 | 45 |
| Невозмущённый изопикнический уровень, м | 45 | 55 | 50 | 30 |
| Плотность невозмущённого изопикнического уровня, кг/м ³ | 1000.17 | 1000.225 | 1000.22 | 1000.15 |
| Характеристики воды в кольце | | | | |
| Температура (Т, °С) | 1.2-1.4 | 1.2-1.3 | 1.2-1.4 | 1-1.2 |
| Удельная электропроводность (мкС/см) | 120.5-121.5 | 119.5-120.5 | 120.5-121.5 | 263-265 |
| Разница между структурой воды внутри и вне кольца | | | | |
| Т (°С), глубина 0-30 м | 0.6 | 0.3 | 0.4 | 0.1-0.2 |
| Т (°С), глубина 80-90 м | -1.3 | -0.6 | -1.1 | -0.4 |
| Удельная электропроводность (мкС/см), глубина 0-30 м | 1 | 1 | 1 | 0.4 |
| Удельная электропроводность (мкС/см), глубина 80-90 м | -1 | -1 | -1 | -1 |
| Характеристика поверхности льда | снег 0-1 см, ледяная корка | прозрачный кристаллический лёд, с участками снега (0-2 см) | снег 0-1 см, ледяная корка | снег 1-1.5 см, до 4-5 см на станции 7 |
| Толщина льда (см) - центр кольца | 65-72.5 | п.а. | 49-65.5 | п.а. |
| Толщина льда (см) - кольцо | 68.5-74 | 105 | 32-61 | 87-102 |
| Толщина льда (см) - вне кольца | 80-91 | 108.5-122 | 61-73 | 94-99 |
| Радиус кольца, км | 3 | 2.7 | 3.5 | 3.1 |
| Бароклинный радиус деформации Россби, км (внутри/вне кольца) | 2.8/3.25 | 2.34/2.55 | 2.95/3.04 | 2.9/3.16 |

Во время всех четырёх съёмок лёд был черный, с кристаллической структурой (иногда с ледовой коркой и/или снегом на льду, см. Табл. 2) и без примесей. На льду не наблюдалось воды, а подо льдом на границе раздела не было пузырей газа. В 2012 г. лёд был толще (80-91 см) за пределами кольца, в то время как в самом кольце и внутри него он был тоньше (65-74 см). В 2014 году лёд был толстый снаружи кольца (61-73 см), менее толстый в центре (49-65 см), и гораздо тоньше (32-61 см) в самом кольце, в особенности на двух станциях в северной части разреза G-H (32 см для станции 401 и 34 см для станции 402). На этих двух станциях мы наблюдали большие кристаллы игольчатого льда (до 12 см длиной и 2-3 см толщиной, рис. 6 а), сформировавшиеся на нижней границе льда. На соседних станциях 315 и 316 на границе раздела игольчатой структуры не определялось, но лёд был насыщен водой начиная с глубины 30-35 см. Эта

северная часть кольца представляет собой продвинутую стадию таяния и метаморфизма льда, которые в дальнейшем будут характерны и для других частей ледового кольца. Дальнейшее развитие ледового кольца приведет к более тонкому льду в кольце, метаморфизму, разломам, появлению разводий и, в конце концов, к разрушению ледового покрова (рис. 1i, рис. 3).

Измеренные поля течений в 2014 (рис. 6b) и 2015 (рис. 5a) гг. подтверждают типичное антициклоническое (по часовой стрелке) направление вращения вихря, течения направлены примерно на 30-45° влево по отношению к кольцу. Это согласуется с геострофическом потоком, обусловленным трением о лёд, хотя природа и механизмы этого эффекта ещё не установлены. С другой стороны, возможно и влияние более крупномасштабного поля течений на вихревое движение. Течения в центре кольца в 2014 году отсутствовали или были слабы, самая большая скорость наблюдалась в северной части кольца

(особенно на станции 402 - одной из двух станций с минимальной толщиной льда). Это указывает на то, что скорость течения (и, таким образом, интенсивный теплообмен между льдом и водой), а не наличие более тёплой воды в центре кольца, является основным фактором, связанным с таянием и метаморфизацией льда.

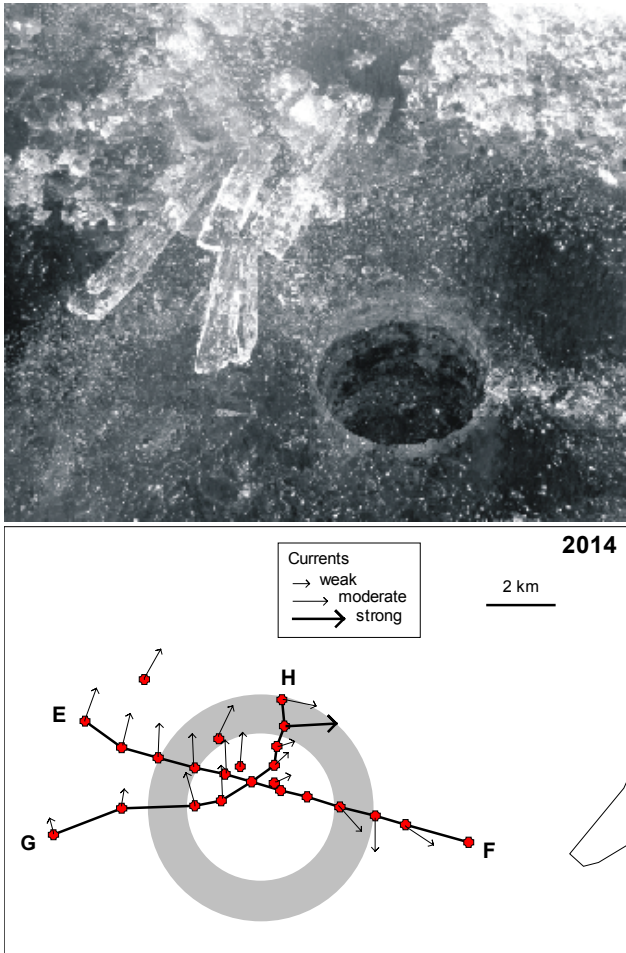


Рисунок 6. (а) Кристаллы игольчатого льда с нижней части ледового покрова (диаметр отверстия - 11 см, длина кристаллов 10-12 см, а толщина - 2-3 см) на станции 401, 3 апреля 2014 года; (б) сила и направление течений (weak - слабое, moderate - умеренное, strong - сильное течение) в районе кольца у мыса Нижнее Изголовье 3-4 апреля 2014.

Диаметр ледовых колец сравним с бароклинным внутренним радиусом деформации Россби для двухслойной жидкости, рассчитываемым по формуле:

$$L_i = \sqrt{\frac{g * \Delta\rho * h_1 * h_2}{\rho_0 * f}},$$

где g - ускорение силы тяжести, $\Delta\rho$ - перепад плотности между двумя слоями, ρ_0 - плотность стандартной воды 1000 кг/м^3 , h_1 и h_2 - толщина верхнего и нижнего слоёв, а f - параметр Кориолиса (Kirillin et al. 2012). Радиус деформации Россби, рассчитанный с использованием вертикальных

профилей воды как снаружи так и внутри колец (таблица 2) составляет 2.8-3.25 км. Радиус ледовых колец изменяется от 2.7 км до 3.5 км, таким образом, он точно соответствует радиусу деформации Россби.

Обсуждение и выводы

Наиболее полный существующий перечень ледовых колец на основе спутниковых снимков и фотографий содержит 45 ледовых колец для озера Байкал и впервые обнаруженные четыре ледовых кольца для озера Хубсугул. Сравнительно недавно задокументированные ледовые кольца не являются новым явлением, так как они наблюдались ещё в 1974-1975 годах, как показали наши исследования архивных спутниковых изображений.

Ледовые кольца - это проявление на поверхности льда динамики вод, связанной с линзовидными вихрями подо льдом. Наши полевые наблюдения структуры воды для четырех ледовых колец в озёрах Байкал и Хубсугул проведённые в 2012-2015 гг. представляют чёткое доказательство присутствия подповерхностных (подлёдных) антициклонических (по крайней мере, для районов наших наблюдений) относительно тёплых двояко-выпуклых линзовидных вихрей. Они имеют изолированную круглую форму, и обладают радиальной симметрией. Их радиус сравним с бароклинным радиусом деформации Россби и их положение совпадает с положением ледовых колец в пространстве. Они существуют до и продолжают существовать во время проявления и развития ледовых колец. Вихри под ледовыми кольцами характеризуются слабым или умеренным течением в центральной части, и сильным течением в области кольца, ориентированным на $30-45^\circ$ влево относительно касательной к границе вихря. Увеличение теплообмена между льдом и водой на границе вихря приведет к заметному уменьшению толщины льда по сравнению с центром кольца или областями вне кольца. Области тонкого и, как следствие, более тёмного льда идентифицируются на спутниковых снимках как гигантские ледовые кольца.

Ледовые кольца - это проявление воздействия линзовидных вихрей на поверхности льда, однако предлагаемый механизм образования ледовых колец поднимает новый ряд вопросов, связанных с местоположением и стационарностью вихрей, длительностью их существования, временем и механизмами их генерации.

Что касается **расположения** ледовых колец, мы можем наблюдать, что они в основном связаны с областями значительных уклонов дна и часто расположены в вершинах подводных впадин (см. рис. 2). Сочетание местных условий: свал глубин, форма береговой линии, поле ветра и речной сток могут способствовать образованию вихрей и их локализации в зимний период. Неясно, квазистационарны ли вихри, медленно перемещаются ли они на одной и той же глубине после их возникновения, или они поднимаются к поверхности из более глубоких слоёв в процессе их эволюции. Линзовидные вихри могут медленно перемещаться или быть квазистационарными в зависимости от

крупномасштабной циркуляции вод. Линзовидные вихри в озере Байкал слишком малы, чтобы самостоятельно перемещаться под воздействием бета-эффекта. В зависимости от исходной структуры ледового покрова, квазистационарные линзы могут производить классическую "кольцевую" структуру, в то время как дрейфующие линзы в зависимости от скорости адвекции и глубины линзы могут приводить либо к возникновению тёмных пятен, либо вообще не давать никакого эффекта.

Время существования линзовидных вихрей в озере Байкал может достигать до нескольких месяцев, что является реалистичной оценкой, основанной на времени наблюдения ледовых колец (см таблицу 1) и том факте, что подобные структуры в других морях и океанах являются долговечными. Этот эффект объясняется более слабым турбулентным перемешиванием на промежуточных глубинах по сравнению с поверхностью океана или озера.

Время появления вихря установить достаточно сложно, поскольку это требует долгосрочного *in-situ* мониторинга с высоким пространственным и временным разрешением. Мы можем предложить две гипотезы. Первая - вихри образуются подо льдом, когда ледовый покров стабилен. В зимний период, при синоптических изменениях атмосферного давления, механическая энергия непрерывно переносится из атмосферы через лёд в толщу воды. Как и в свободный ото льда период, возникают сейши, внутренние волны и нагоны, и их амплитуда сравнима с величинами, наблюдаемыми летом и осенью (Pomutkin 1960).

Другая гипотеза состоит в том, что вихри образуются в какой-то момент между осенним вертикальным перемешиванием и образованием льда. После вертикального перемешивания, более холодная и более лёгкая вода остаётся на поверхности, в то время как вихрь опускается на глубину уровня нейтральной плавучести. Поверхностные вихри и ледовые кольца редко наблюдаются в начале зимы (лишь одно исключение было отмечено выше вблизи мыса Нижнее Изголовье в 2009 году, см рис. 3). В зимний период, и особенно весной, когда верхний слой воды начинает прогреваться (и, таким образом, становится более плотным), вихрь поднимается вверх, в конечном счёте, достигая ледового покрова, и начинает приводить к таянию льда и формированию ледового кольца.

Что касается **механизмов генерации**, наш перечень колец и полевые измерения структуры воды показывают, что гипотеза, связанная с выходом газов не может служить универсальным объяснением механизмов формирования вихрей и ледовых колец. Тепловыделение из донных отложений также должно играть незначительную роль для глубоких озёр Байкал и Хубсугул. Существует несколько потенциальных механизмов генерации вихрей: неустойчивость прибрежного течения; воздействие поля ветра на поверхность воды до начала ледообразования; сейши, индуцированные воздействием атмосферного давления на ледовый покров; речной сток или взаимодействие прибрежного течения с береговой линией, как это наблюдается, например, около мыса Нижнее Изголовье. В этом районе, где мы неоднократно обнаруживали ледовые кольца и линзообразные вихри в 2012 и 2014 гг. (см. Рис. 4), нередко наблюдаются направленные по часовой стрелке кольцевые течения (антициклонические вихри) как осенью, так и во время образования льда (рис. 7).

Есть ещё ряд открытых вопросов, таких как источники и условия, необходимые для формирования вихря и его поддержания в течение зимы, количество вертикального потока тепла и структура пограничных течений, необходимых, чтобы частично растопить лёд, которые выходят за рамки данной статьи. Это задача для численного моделирования и дальнейших полевых исследований.

Обнаружение линзовидных вихрей требует специализированных и хорошо организованных полевых исследований с очень высокой (порядка сотен метров) пространственной частотой измерений. В случае озёр Байкал и Хубсугул, обнаружение и исследование вихрей облегчается наличием стабильного ледового покрова, что дает возможность наблюдать их проявление в виде гигантских круглых ледовых колец.

Обсуждение все ещё продолжается, и мы будем рады приветствовать новые идеи. Дальнейшие исследования и мониторинг ледовых колец и линзовидных вихрей на основе спутниковых наблюдений, полевых измерений и численного моделирования принесут новые идеи для лучшего понимания этого интересного явления.

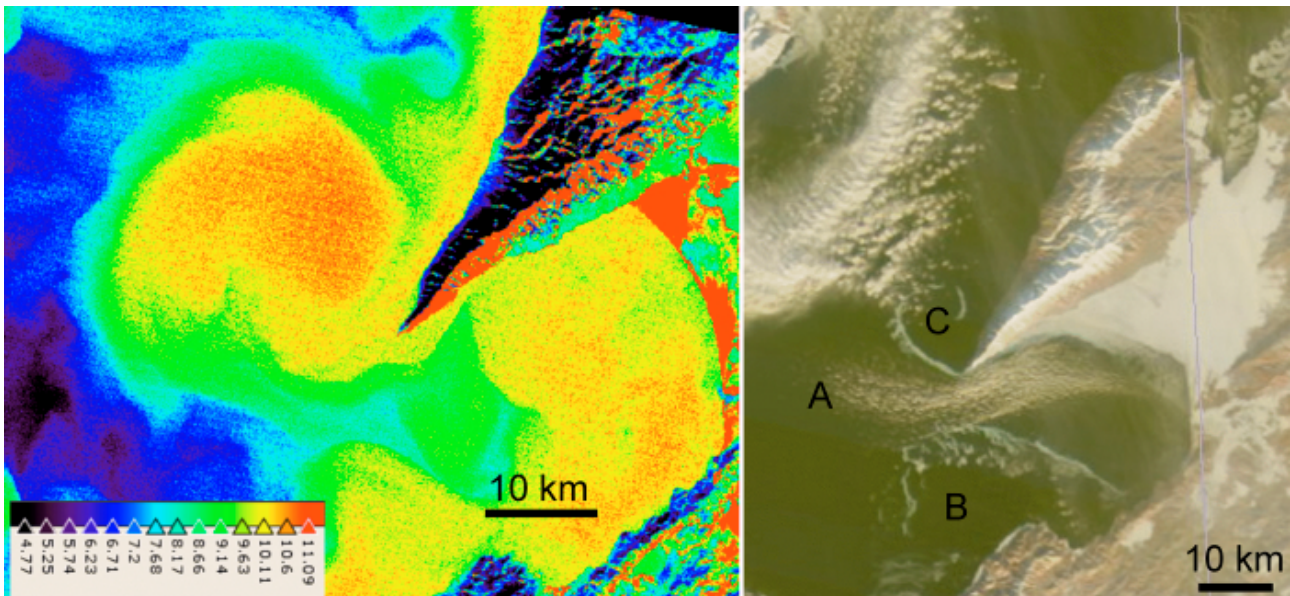


Рисунок 7. Динамика воды в районе мыса Нижнее Изгололье. Слева: снимок температуры поверхности воды ($^{\circ}$ C) со спутника Landsat от 26 сентября 2002 года, показывающий формирование антициклоническим тёплого вихря. Справа: снимок MODIS от 31 декабря 2011 года, на котором видно, как сильный ветер, дующий из Баргузинского залива (A, наблюдаемый по линиям облаков, направленных в сторону озера), порождает дипольную структуру в воде озера, проявляющуюся в виде двух линий дрейфующего льда, при этом циклоническая часть закручивается к юго-западу (B), а антициклоническая - к северо-западу (C).

Благодарности. Мы хотели бы горячо поблагодарить А. Бекетова (Усть-Баргузинский национальный парк, Усть-Баргузин, Россия), Т. Тивикову (Туркинский лесхоз, Турка, Россия), С. Сушкеева (Тункинский национальный парк, Тунка, Россия), Хургу и Бимбу (Хубсугульский национальный парк, Монголия), А. Лалетина и многих других, кто непосредственно участвовал или помогал организовывать полевые исследования. Мы выражаем признательность Н.Г. Гранину (ЛИН СО РАН, Иркутск, Россия), Е. Berthier (LEGOS-OMP, Тулуза, Франция) и многим другим коллегам за интересные и полезные дискуссии. Исследование поддержано проектами CNES TOSCA “Lakes,” CNRS PICS “BaLaLaICA,” RFBR 13-05-91051, ERA.NET RUS Plus S&T #226 “ERALECC,” FZP 1.5, ANR “CLASSIQUE,” IDEX Transversalité 2013 InHERA, FP7 MONARCH-A, GDRI “CAR-WET-SIB” и Франко-Сибирским Центром по науке и образованию.

Библиография

Armi, L., and W. Zenk. 1984. Large lenses of highly saline Mediterranean water. *J. Phys. Oceanogr.* 14: 1560–1576. doi:10.1175/1520-0485(1984)014<1560:LLOHSM>2.0.CO;2

Balkhanov, V. K., Y. B. Bashkuev, and V. B. Khaptanov. 2010. Formation of circular rings on the snow covered ice field of Lake Baikal. *Tech. Phys.* 55: 1266–1269. doi: 10.1134/S1063784210090057

Bordonskiy, G. S., and S. D. Krylov. 2014. On the nature of ringlike structures on satellites images of Lake Baikal ice cover, p. 27–31. *Issledovaniye Zemly iz Kosmosa N4* (In Russian).

Circles in thin ice, Lake Baikal, Russia [accessed 2009 May 25]. Available from

<http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id538721>

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

Earth Explorer website [accessed 2015 June]. Available from <http://earthexplorer.usgs.gov/>

Evans, C. A., M. R. Helfert, and D. R. Helms. 1992. Ice patterns and hydrothermal plumes, Lake Baikal, Russia: Insights from Space Shuttle hand-held photography, v. 2, p. 1559–1561. In *International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 92*.

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

Galaziy, G. I. [ed.]. 1993. *Baikal. Atlas*. (In Russian, Russian Academy of Sciences, Siberian branch. Moscow, Federal Service of geodesy and cartography).

Granin, N. G. 2009. The ringed Baikal. *Science from First Hands (Nauka iz pervykh ruk)* 3: 22–23 (In Russian).

Granin, N. G., and others. 1999. Turbulent mixing in the water layer just below the ice and its role in development of diatomic algae in Lake Baikal. *Doklady Akademii Nauk* 366: 835–839 (In Russian).

Granin, N. G., M. M. Makarov, K. M. Kucher, and R. Y. Gnatovsky. 2010. Gas seeps in Lake Baikal—detection, distribution, and implications for water column mixing. *Geo Mar. Lett.* 30: 399–409. doi:10.1007/s00367-010-0201-3

Granin, N. G., V. V. Kozlov, E. A. Tsvetova, and R. Y. Gnatovsky. 2015. Field studies and some results of numerical modeling of a ring structure on Baikal ice. *Doklady Earth Sci.* 461: 316–320. doi:10.1134/S1028334X15030204

- Graves, K. E. 2015. Under-ice circulation in an Arctic lake: Observations from two field seasons in Lake Kilpisjarvi, Finland, 69 pp. Master thesis. The Faculty of Graduate and Postdoctoral Studies (Civil Engineering), The University of British Columbia, Vancouver.
- Hsu, J. 2009. Mystery of giant ice circles resolved [accessed 2009 June 1]. Available from <http://www.livescience.com/strangenews/090601-ice-circles.html>
- Ice rings in Lake Baikal continue appearing. ScanEx web site [accessed 2013 May 22]. Available from <http://press.scanex.ru/index.php/en/news/item/3938-baikal>
- Irkutsk RICC website. [accessed 2015 June] Available from <http://geol.irk.ru/bricc.htm>
- Kirillin, G., and others. 2012. Physics of seasonally icecovered lakes: A review. *Aquat. Sci.* 74: 659–682. doi: 10.1002/2014GL062180
- Kirillin, G. B., and others. 2015. Axisymmetric circulation driven by marginal heating in ice-covered lakes. *Geophys. Res. Lett.* 42: 2893–2900.
- Kostianoy, A. G., and I. M. Belkin. 1989. A survey of observations on intrathermocline eddies in the World Ocean, p. 821–841. In J. C. J. Nihoul and B. M. Jamart [eds.], *Proceedings of the 20th International Liege Colloquium on Ocean Hydrodynamics “Mesoscale/synoptic coherent structures in geophysical turbulence.”* Elsevier.
- Kouraev, A. V., S. V. Semovski, M. N. Shimaraev, N. M. Mognard, B. Legresy, and F. Remy. 2007a. Observations of lake Baikal ice from satellite altimetry and radiometry. *Rem. Sens. Environ.* 108: 240–253. doi:10.1016/j.rse.2006.11.010
- Kouraev, A. V., S. V. Semovski, M. N. Shimaraev, N. M. Mognard, B. Legresy, and F. Remy. 2007b. Ice regime of lake Baikal from historical and satellite data: Influence of thermal and dynamic factors. *Limnol. Oceanogr.* 52:1268–1286. doi:10.4319/lo.2007.52.3.1268
- Kouraev, A. V., M. N. Shimaraev, F. Remy, A. Y. Ivanov, and B. N. Golubov. 2010a. An interesting natural phenomenon—giant rings on Lake Baikal ice. *European Geophysical Union (EGU) 2010 Proceedings, Vienna.*
- Kouraev, A. V., M. N. Shimaraev, F. Remy, A. Y. Ivanov, and B. N. Golubov. 2010b. Giant rings on ice of the Lake Baikal: A look from space and from beneath. In H. Lacoste Francis [ed.], *ESA living planet symposium, Bergen 2010. SP-686 ESA Living Planet Symposium, digital media.* ISBN: 978-92-9221-250-6.
- LAADS WEB, Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System [accessed 2015 June]. Available from <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>
- Mackay, A. W., R. W. Battarbee, R. J. Flower, N. G. Granin, D. H. Jewson, D. B. Ryves, and M. Sturm. 2003. Assessing the potential for developing internal diatom-based inference models in Lake Baikal. *Limnol. Oceanogr.* 48: 1183–1192. doi:10.4319/lo.2003.48.3.1183
- Mackay, A. W., D. B. Ryves, R. W. Battarbee, R. J. Flower, D. Jewson, P. Rioual, and M. Sturm. 2005. 1000 years of climate variability in central Asia: Assessing the evidence using Lake Baikal diatom assemblages and the application of a diatom-inferred model of snow thickness. *Glob. Planet. Change* 46: 281–297. doi:10.1016/j.gloplacha.2004.09.021
- McWilliams, J. C. 1985. Submesoscale, coherent vortices in the Ocean. *Rev. Geophys.* 23: 165–182. doi:10.1029/RG023i002p00165
- Moore, M. V., S. E. Hampton, L. R. Izmet’eva, E. A. Silow, E. V. Peshkova, and B. Pavlov. 2009. Climate change and the world’s “Sacred Sea”—Lake Baikal, Siberia. *BioScience* 59: 405–417. doi:10.1525/bio.2009.59.5.8
- Pomytkin, B. A. 1960. On the level surges in Lake Baikal. *Proc. Baikal Limnol. Station XVIII:* 242–263 (In Russian).
- Ring-like structures on the ice of the lake Baikal—manifestation of the geological processes. 2009. Available from http://www.geol.irk.ru/baikal/krugi/baikal_ring.html (In Russian)
- Semovski, S. V., N. Y. Mogilev, and P. P. Sherstyankin. 2000. Lake Baikal ice: Analysis of AVHRR imagery and simulation of under-ice phytoplankton bloom. *J. Mar. Syst.* 27: 117–130. doi:10.1016/S0924-7963(00)00063-4
- Strange circles on Lake Baikal detected by satellite. ScanEx [accessed 2009 May 14]. Available from http://www.scanex.ru/en/news/News_Preview.asp?id5n24767232.
- The Gateway to Astronaut Photography of Earth (NASA Crew Earth Observations). 2013. [accessed 2013 November]. Available from <http://eol.jsc.nasa.gov/>
- Verbolov, V. I., V. M. Sokol’nikov, and M. N. Shimaraev. 1965. *Gidrometeorologicheskiy regim i teplovoy balans oz. Baikal* (In Russian) [Hydrometeorological regime and heat balance of Lake Baikal]. Nauka.