

## НАБЛЮДЕНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ СТРУКТУР НА ЛЬДУ БАЙКАЛА С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВ SENTINEL 1 И SENTINEL 2 ВЕСНОЙ 2018-2019

*Родионова Н.В.*

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
Фрязино

Проведен анализ изображений кольцевых структур на льду Байкала, полученных с помощью радарных данных Sentinel 1 С-диапазона и мультиспектральных данных Sentinel 2 с пространственным разрешением 10 метров за апрель 2018-2019 годов. Кольцевые структуры на изображениях обнаружены в районе мыса Нижнее Изголовье полуострова Святой Нос, мыса Улан-Нур, залива Посольский Сор в 2018 году и в районе мыса Н. Изголовье, в северной части Малого моря и в южной части Байкала в районе Слюдянки в 2019 году.

*Ключевые слова:* Sentinel 1 радарные данные С-диапазона, Sentinel 2 мультиспектральные данные, кольцевые структуры на льду Байкала, коэффициент обратного рассеяния.

**Введение.** На спутниковых снимках Байкала на весеннем льду можно увидеть тёмные кольца диаметром 5-7 км и шириной около 1 км. Чаще всего такие кольца появляются в апреле или в начале мая, иногда в январе. Средняя продолжительность существования этих явлений – 7-10 дней. Лёд в центре и вне кольца более толстый и белый, а в самом кольце – тёмный и более тонкий. Кольца возникают достаточно непредсказуемо в разных местах и в разные годы [1]. Исследованием кольцевых структур спутниковыми (LANDSAT, MODIS, SPOT, Sentinel) и наземными методами и построением гипотез и моделей возникновения данных структур занимались многие авторы [2-7]. Как отмечал Кураев [7], ледовые кольца не новый феномен. Они были обнаружены на архивных снимках американского спутника LANDSAT, датированных ещё началом 1970-х годов. Кольца на льду Байкала возникают на прежних местах не каждый год, возможно их появление на новых местах, поэтому мониторинг колец методами ДЗЗ необходим как с научной точки зрения, так и с точки зрения безопасности передвижения по льду людей и автотранспорта. В работе Кураева и др. [7] приведен наиболее полный перечень обнаруженных кольцевых структур на льду Байкала.

В данной работе приводятся изображения кольцевых структур на льду Байкала, обнаруженных в весенний период 2018, 2019 годов по радарным данным Sentinel-1 (S1) и оптическим данным Sentinel-2 (S2).

Преимуществом радарной съемки является получение изображения поверхности независимо от погоды и времени суток. Для получения качественных оптических снимков серьезным препятствием являются облачность и ограниченное время съемки.

Видимость кольцевых структур на льду в оптическом диапазоне совершенно другая, чем на радиолокационном изображении (РЛИ) из-за разных физических механизмов формирования изображений. В видимом диапазоне (в отраженном солнечном свете) кольцо на льду состоит из белого ледяного центра, где лед толще, и правильного темного кольца, где лед тоньше. В то же время на РЛИ кольцо можно обнаружить из-за шероховатости поверхности льда, а именно, по сети видимых на РЛИ периферийных трещин, которые могут указывать на таяние льда, определенно связанное с кольцом. Увеличение шероховатости приводит к увеличению коэффициента обратного рассеяния (КОР) и более ярким областям на РЛИ. Таяние льда иногда приводит к образованию полыньи, что на РЛИ обнаруживается по темному тону.

**Исходные спутниковые данные.** Спутник ESA Sentinel 1A запущен в апреле 2014 года, Sentinel 1B в апреле 2016 года. На борту S1 установлен PCA (радар с синтезом апертуры), который обеспечивает всепогодную поставку космических снимков в открытом доступе. Съемка выполняется в С-диапазоне (длина волны 5.4 см) с разным пространственным разрешением в зависимости от режима съемки. В данной работе использовался режим IW (interferometric wide swath) моды с поляризациями VV и VH и пространственным разрешением 10 м. Спутники находятся на одной орбите, осуществляя съемку одной и той же территории с

периодичностью 12 дней, при работе двух спутников 6 дней. Работа с изображениями S1 осуществлялась с помощью программы S1Toolbox и позднее SNAP [8]. Предварительная обработка радарных данных включала в себя выделение фрагмента с исследуемой областью и радиометрическую калибровку.

Спутник ESA Sentinel 2A запущен в июне 2015 года, второй Sentinel 2B в марте 2017 года. Периодичность мультиспектральной съемки каждым спутником составляет 10 дней, а при работе двух аппаратов – 5 дней. В мультиспектральной камере 13 каналов с разным пространственным разрешением (ПР) от 10 до 60 метров. Для каналов B2 (490 нм), B3 (560 нм), B4 (665 нм) и B8 (842 нм) ПР=10 м. Для получения изображений в естественных цветах в RGB кодировке используется комбинация каналов 4 3 2. Обработка изображений осуществлялась программой SNAP.

**Кольцевые структуры 2018-2019 годов по данным S1 и S2.** *А. П-ов Святой Нос, мыс Нижнее Изголовье, апрель 2018 и 2019.* В апреле 2018 года кольцевые структуры на льду появились у мыса Н. Изголовье на том же месте, что и в предыдущие годы. На рис. 1, *а* и *б* показаны снимки S2 за 23 и 28 апреля 2018 года в комбинации каналов 4 3 2, и на рис. 1, *в* приведено поляриметрическое изображение за 26 апреля 2018 года в комбинации каналов VV и VH (RGB кодировка: красный цвет – VV, зеленый – VH, синий – VV/VH). В данном случае на радарном изображении проблематично найти кольцевые структуры без «оптической подсказки».

Особенность кольцевых структур в районе мыса Н. Изголовье в 2019 году состоит в появлении 2-х колец (рис. 2), одного кольца на обычном месте (слева от мыса) с координатами центра 53,456<sup>0</sup> с.ш., 108,316<sup>0</sup> в.д. и второго справа от мыса с координатами 53,46 с.ш., 108,626 в.д. (координаты даны по снимку S1 за 3 мая 2019 года).

В данном случае не только на оптическом, но на радарном снимке визуально обнаруживаются два кольца в районе мыса Н. Изголовье.

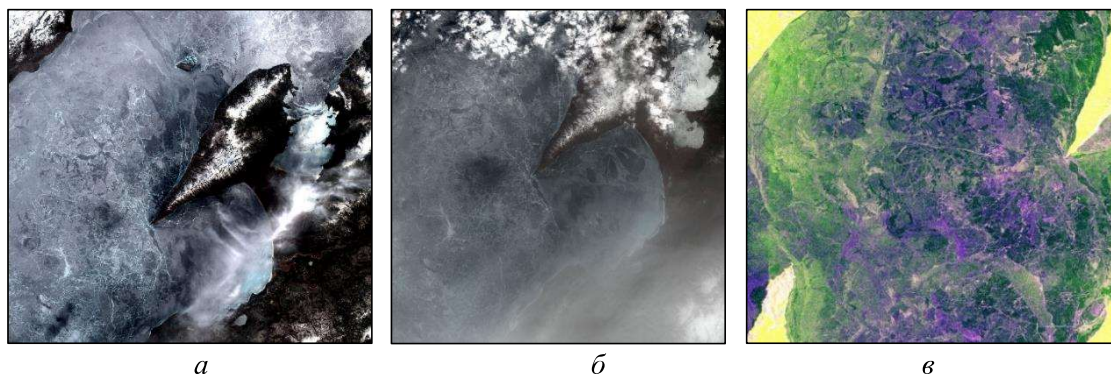


Рис. 1. Снимки S2B L1C, дата съемки 23.4.2018 (*а*) и 28.4.2018 (*б*), каналы 4-3-2; поляриметрическое изображение (*в*) за 26.4.2018.



Рис. 2. Снимки S2B L1C, дата съемки 23 и 28 апреля 2019 (слева и в центре) каналы 4-3-2, поляриметрическое изображение дата съемки 3.5.2019, угол обзора 35<sup>0</sup> (справа).

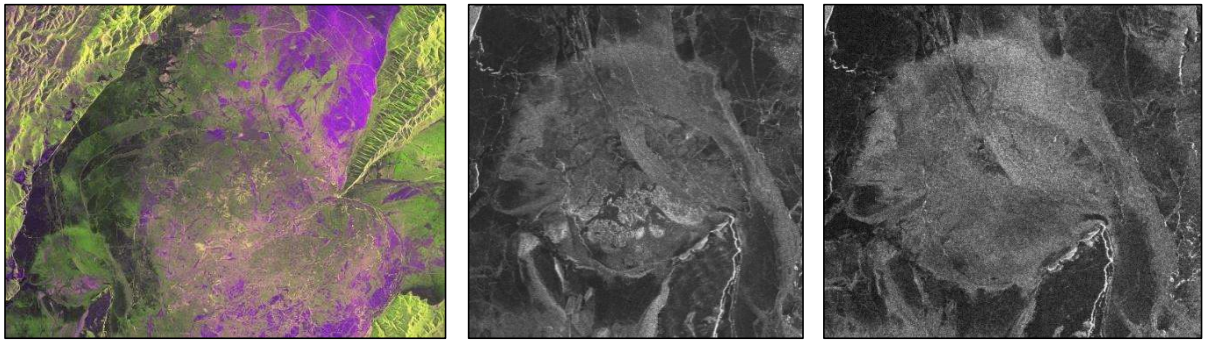


Рис. 3. Поляриметрическое изображение кольца в районе северной части Малого моря, и радарные изображения кольца поляризации VV и VH дата съемки 9 апреля 2019 года.



Рис. 4. S1 изображения за 16.4.2019, 21.4.2019, и Terra MODIS изображение за 24.4.2019.

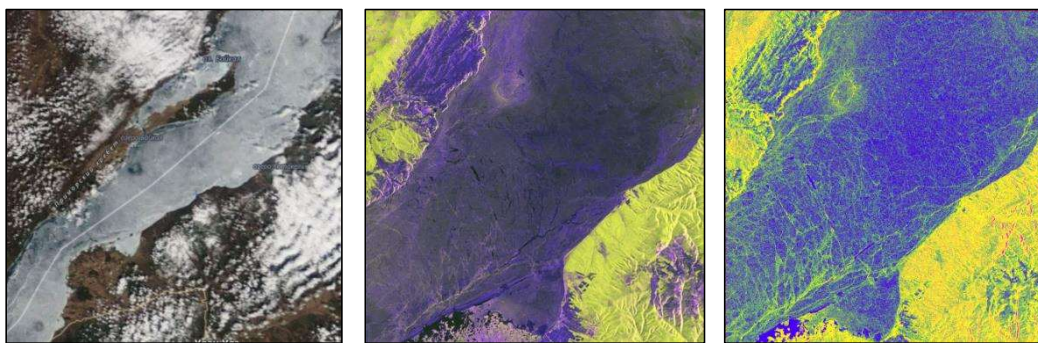


Рис. 5. *А* – снимок MODIS, дата съемки 25.4.2018; S1 поляриметрическое (*б*) и текстурное (*в*) изображение за 26.4.2018.

*Б. Малое море север.* В апреле 2019 года в северной части пролива Малое море наблюдалась обширная кольцевая структура, визуально определяемая как на радарном, так и на оптическом изображениях. На рис. 3 (слева) показано поляриметрическое изображение за 9.4.2019, угол обзора  $36^{\circ}$ , координаты центра кольца 53,46 с.ш, 107,7 в.д., диаметр кольца порядка 17 км. На рис. 3 (в центре и справа) показана структура внутри кольца на радарных изображениях для поляризаций VV и VH.

На рис. 4 приведена последовательность радарных поляриметрических изображений кольца в районе северной части Малого моря за 16 и 21 апреля 2019 года.

Кольцевые структуры наблюдались в 2019 году также с восточной стороны Ольхона. На рис. 4 (справа) дан снимок Terra MODIS за 24.4.2019 года в комбинации каналов 1 4 3, где обнаруживаются две кольцевые структуры с восточной стороны Ольхона: одна справа от пролива Ольхонские ворота и вторая в направлении на северо-восток. На этом же изображении видны два кольца по обе стороны мыса Н. Изголовье и кольцо в районе Малого моря, север.

*В. Мыс Улан-Нур, апрель 2018.* На изображении MODIS (рис. 5,*а*) дата съемки 25.4.2018 в комбинации каналов 1-4-3 (каналы 1 и 2 (0.62-0.67 мкм и 0.841-0.876 мкм, соответственно),

ПР=250 м; канал 4 (0.545-0.565), ПР =500м) наблюдаются три кольцевые структуры: в районе мыса Н. Изголовье, мыса Улан-Нур и залива Посольский Сор.

На S1 поляриметрическом РЛИ (RGB кодировка: красный цвет- VV поляризация, зеленый цвет – VH поляризация, синий цвет – VV/VH) за 26.4.2018, угол обзора 39.2°, видим кольцевую структуру с координатами центра 52.798°с.ш., 106.8055°в.д. в районе мыса Улан-Нур (рис. 5,б). Размеры кольца порядка 4.5 км. На текстурном изображении (рис. 5,в) (текстурные признаки Харалика [9]) кольцо лучше различимо в сравнении с поляриметрическим изображением, и текстурные признаки позволяют осуществить интерпретацию изображения. А, именно, контур кольца (желтый цвет) свидетельствует о повышенном значении «контраста» и «энтропии», т.е. наличии перепадов высот и хаоса на фоне основного синего цвета (гладкая поверхность льда).

Г. Залив Посольский Сор, март, апрель 2018. На рис. 6 показана последовательность изображений S2 с кольцевой структурой с координатами 51.9254°с.ш., 105.9647°в.д. в районе залива Посольский Сор, даты съемки 29 марта, 8, 16 и 23 апреля 2018 года. На рис. 7,а показано поляриметрическое изображение этого района, дата съемки 19.4.2018. Распознать кольцевую структуру (показана стрелкой и выделена окружностью) на РЛИ проблематично (несколько светлее тон). На текстурном изображении (рис. 7,б) в области ледового кольца отмечается более высокое значение «энтропии» (зеленый цвет) – повышенный хаос – в сравнении с окружением, и структура более различима визуально в сравнении с поляриметрическим изображением. Отметим, что в области ледового кольца у мыса Улан-Нур на текстурном изображении текстурный признак «энтропия» также имеет повышенное значение.

Д. Слюдянка, апрель 2019 года. На рис. 8 показана последовательность изображений S2 кольцевой структуры в южной части Байкала в районе Слюдянки, координаты кольца 51.685°с.ш., 103.85°в.д. Кольцо наблюдалось даже 1 мая 2019 года.

**Причины и механизмы образования кольцевых структур на льду. Версии. Гипотезы.** В настоящее время есть несколько гипотез о причинах и механизмах образования кольцевых ледовых явлений. Так, по мнению ряда авторов, Балханова и др. [4], Гранина и др. [3], Гунина [5], образование кругов связано с выбросами природного горючего газа (метана) из осадочной толщи дна Байкала. Механизм образования колец на ледяной поверхности, возможно, таков: газ, поднимаясь со дна Байкала, действует на восходящий водный поток, который при подъеме закручивается силами Кориолиса. В итоге в приповерхностном слое воды подо льдом формируется круговое относительно теплое течение, разрушающее ледяной покров снизу, напитывая его водой, и на поверхности льда проявляется темное кольцо [3].

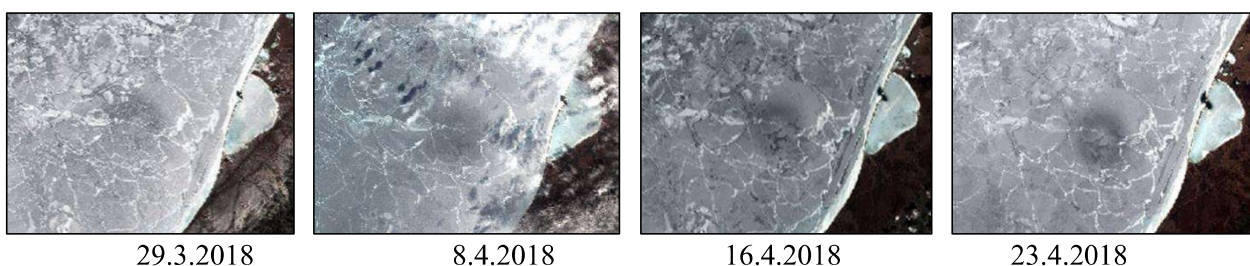


Рис. 6. Кольцевая структура в районе залива Посольский Сор по снимкам S2A MSI L1C в марте и апреле 2018 года, комбинация каналов 4-3-2.

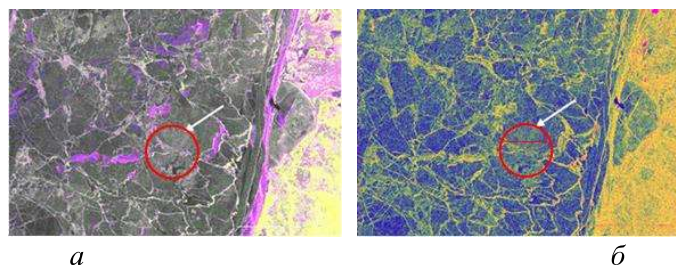


Рис. 7. S1 поляриметрическое (а) и текстурное (б) изображения района залива Посольский Сор, дата съемки 19.4.2018.

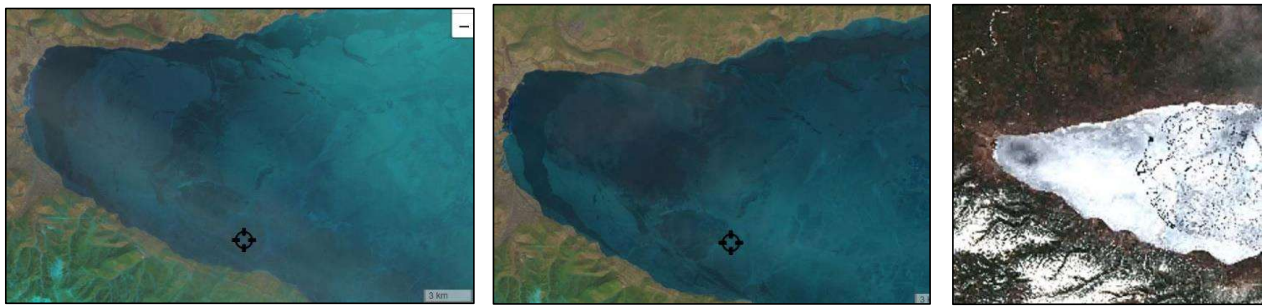


Рис. 8. S2 изображения за 14.4.2019, 29.4.2019 и 1.5.2019.

По версии Бордонского и Крылова [2] кольца образуются из-за нарушения структуры льда вследствие воздействия на лёд переменных потоков тепла в условиях резко континентального климата, когда возникают значительные перепады дневных и ночных температур.

Авторы [6] считают главной причиной образования колец на льду озера Байкал подледные антициклонические вихри, которые возникают в определенных местах озера благодаря общей циркуляции и особенностям подводной топографии. Основным свидетельством в пользу вихрей является их генерация в тех же самых местах в условиях отсутствия льда, что видно время от времени на оптических IR и радарных изображениях.

Переосмыслению существующих гипотез и предложению гипотезы о линзовидных вихрях как причине появления колец на льду Байкала посвящена работа Кураева и др. [7], основу которой составили натурные измерения на более чем 250 станциях в районах уже известных или возможных появлений кольцевых структур.

Дальнейшие спутниковые наблюдения, натурные измерения, создание моделей генерации волн в замкнутом бассейне со сложной береговой структурой и подводной топографией, не без влияния придонных процессов, помогут лучше понять феномен ледовых колец и прогнозировать время и место их появления на Байкале.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] [http://www.geol.irk.ru/baikal/baikal/krugi/baikal\\_ring.html](http://www.geol.irk.ru/baikal/baikal/krugi/baikal_ring.html).
- [2] Бордонский Г.С., Крылов С.Д. О природе кольцевых образований на спутниковых снимках ледяного покрова озера Байкал // ИЗК. 2014. №4. С. 27-31.
- [3] Гранин Н.Г., Козлов В.В., Цветова Е.А., Гнатовский Р.Ю. Полевые исследования и некоторые результаты численного моделирования кольцевой структуры озера Байкал // ДАН. 2015. Т. 461. №. 1. С. 316-320.
- [4] Balkhanov V.K., Bashkuev Yu.B., Khaptanov V.B. Formation of circular rings on the snow-covered ice field of Lake Baikal // Technical Physics. 2010. 55(9). P. 1266-1269.
- [5] Gunin V.I. Assessment of gas-hydrothermal activity of the Baikal rift in the lake area from numerical experiment data // Geodynamics & Tectonophysics. 2014. 5(3). P. 763–775.
- [6] Ivanov A., Evtushenko N., Filimonova N., Terleeva N. Atmospheric and oceanic phenomena in Lake Baikal visible from space on SAR and optical images // Proceedings ESA Living Planet Symposium. 2016. 9-13 May 2016, Prague, Czech Republic (ESA SP-740).
- [7] Kouraev V., Zakharova E.A., Remy Fr., Kostianoy A.G., Shimaraev M.N., Hall N.M.J., Suknev A.Y. Giant ice rings on lakes Baikal and Hovsgol: Inventory, associated water structure and potential formation mechanism // Limnol. Oceanogr. 2016. 61. P. 1001–1014. DOI: 10.1002/lno.10268.
- [8] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1>.
- [9] Haralick R.M. Statistical and structural approaches to texture // Proc. IEEE. 1979. 67 (5). P. 786-804.