

Наблюдение кольцевых структур на льду озера Байкал с помощью спутников Sentinel-1 и Sentinel-2 весной 2016–2018 гг.

Н. В. Родионова

*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал, Фрязино, 141190, Россия
E-mail: rnv@ire.rssi.ru*

В работе проведён анализ изображений кольцевых структур на льду оз. Байкал, полученных с помощью радарных данных Sentinel-1 С-диапазона и мультиспектральных данных Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м за март и апрель 2016–2018 гг. Взаимная обработка радарных и оптических изображений даёт значительное преимущество при наблюдении за ледовыми кольцами. Плюсы радарной съёмки состоят в независимости от времени суток, всепогодности, высоком пространственном разрешении. При этом распознать кольцевую структуру на радарном изображении сложнее, чем на оптическом, из-за разных физических механизмов их формирования. Кольцевые структуры на изображениях обнаружены в районе м. Нижнее Изголовье п-ова Святой Нос, м. Улан-Нур, залива Посольский Сор. В данной работе только на двух радарных снимках: в районе м. Нижнее Изголовье, дата съёмки 13 апреля 2016 г., и м. Улан-Нур, 26 апреля 2018 г., — визуально обнаружены кольцевые структуры. Текстурные признаки Харалика способны помочь распознаванию ледовых колец на радарном изображении. Оптические изображения Sentinel-2 являются необходимыми для обнаружения кольцевых структур, но здесь серьёзной помехой становится наличие облачности в момент съёмки.

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

Одобрена к печати: 01.07.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-213-221

Введение

На спутниковых снимках оз. Байкал 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 (http://www.geol.irk.ru/baikal/baikal/krugi/baikal_ring.html). Исследованием кольцевых структур спутниковыми (Landsat, MODIS, SPOT, Sentinel) и наземными методами, а также построением гипотез и моделей их возникновения занимались многие авторы (Бордонский, Крылов, 2014; Гранин и др., 2015; Balkhanov et al., 2010; Gunin, 2014; Ivanov et al., 2016; Kouraev et al., 2016). Как отмечали А. Кураев с коллегами (Kouraev et al., 2016), ледовые кольца — не новый феномен. Они были обнаружены на архивных снимках американского спутника Landsat, датированных ещё началом 1970-х гг.

Кольца на льду Байкала возникают на прежних местах не каждый год, возможно их появление на новых местах, поэтому мониторинг колец методами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) необходим как с научной точки зрения, так и с точки зрения безопасности передвижения по льду людей и автотранспорта. В работе (Kouraev et al., 2016) дан наиболее полный перечень выявленных кольцевых структур на льду Байкала.

В настоящей работе приводятся изображения кольцевых структур на льду Байкала, обнаруженных в весенний период 2016–2018 гг. по радарным данным Sentinel-1 (S1) и оптическим данным Sentinel-2 (S2).

Преимуществом радарной съёмки является формирование изображения поверхности независимо от погоды и времени суток. Для получения качественных оптических снимков серьёзным препятствием становятся облачность и ограниченное время съёмки.

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 отражённом солнечном свете) кольцо на льду состоит из белого ледяного центра, где лёд толще, и правильного тёмного кольца, где лёд тоньше. В то же время на РЛИ кольцо можно обнаружить из-за шероховатости поверхности льда, а именно по сети видимых периферийных трещин, которые могут указывать на таяние льда, определённо связанное с кольцом. Увеличение шероховатости приводит к росту коэффициента обратного рассеяния (КОР) и более ярким областям на РЛИ. В результате таяния льда иногда образуются полыньи, что на РЛИ обнаруживается по тёмному тону.

Следует отметить, что по радарным данным далеко не всегда удаётся обнаружить кольцевые структуры на льду. Необходимо использовать оптическую информацию. В данной работе это взаимная обработка S1- и S2-данных для мониторинга кольцевых структур на льду Байкала.

Исходные спутниковые данные

Спутник ESA Sentinel 1A был запущен в апреле 2014 г., Sentinel 1B — в апреле 2016 г. На борту S1 установлен РСА (радар с синтезом апертуры), который обеспечивает всепогодную поставку космических снимков в открытом доступе. Съёмка выполняется в С-диапазоне (длина волны — 6 см) с разным пространственным разрешением в зависимости от режима съёмки. В настоящей работе использовался режим IW (interferometric wide swath) моды с поляризациями VV (двойная вертикальная) и VH (перекрёстная вертикально-горизонтальная) и пространственным разрешением 10 м. Спутники находятся на одной орбите, осуществляя съёмку одной и той же территории с периодичностью 12 дней при работе двух аппаратов — 6 дней. Работа с изображениями S1 осуществлялась с помощью программы S1Toolbox и позднее — SNAP (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel>). Предварительная обработка радарных данных включала в себя выделение фрагмента с исследуемой областью и радиометрическую калибровку.

Спутник ESA Sentinel 2A был запущен в июне 2015 г., Sentinel 2B — в марте 2017 г. Периодичность мультиспектральной съёмки 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 м. Для каналов B2 (490 нм), B3 (560 нм), B4 (665 нм) и B8 (842 нм) ПР составляет 10 м. Для получения изображений в естественных цветах в RGB-кодировке используется комбинация каналов 4–3–2. Обработка изображений осуществлялась программой SNAP.

Кольцевые структуры 2016–2018 гг. по данным S1 и S2

Полуостров Святой Нос, мыс Нижнее Изголовье, апрель 2016 и 2018 гг.

Динамика развития кольцевой структуры в районе м. Нижнее Изголовье в апреле 2016 г. на радарных изображениях S1 показана на *рис. 1* (см. с. 215), где приведены РЛИ VV-поляризации за 5, 13 и 18 апреля 2016 г. Угол обзора — 41,9°. На радиолокационных изображениях наблюдаем трещины 5 апреля, полынью — 13 апреля (координаты центра — 53,535673° с. ш., 108,38° в. д., размеры структуры — порядка 8 км) и значительное увеличение шероховатости поверхности в районе полыньи 18 апреля 2016 г., что связано, возможно, с взволнованной ветром поверхностью открытой воды или хаосом ломающегося дрейфующего льда.

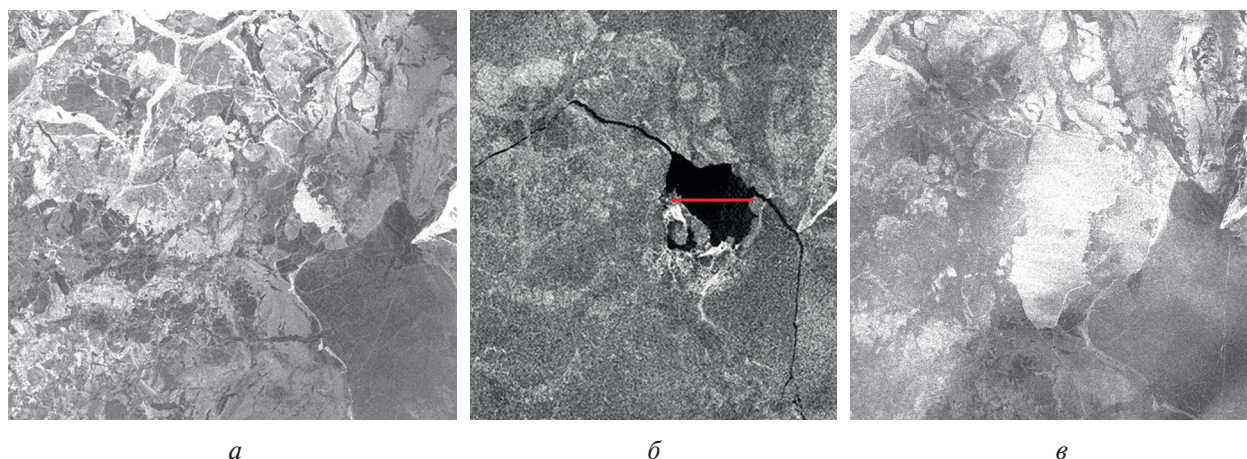


Рис. 1. РЛИ S1, VV-поляризация, даты съёмки: а — 05.04.2016, б — 13.04.2016, в — 18.04.2016

На рис. 2а показаны графики изменения коэффициента обратного рассеяния вдоль профиля, проходящего через полынью (координаты начальной точки — 53,520° с. ш., 108,4631° в. д.), для трёх дней съёмки: 5, 13 и 18 апреля. Коэффициент обратного рассеяния значительно растёт из-за увеличения шероховатости поверхности 18 апреля. Температура воздуха (t) в данном районе по измерениям на метеостанции Усть-Баргузин составляла на момент съёмки спутником S1 (08:00 по местному времени): 05.04.2016 — $t = -2,9$ °С, 13.04.2016 — $t = -1,5$ °С и 18.04.2016 — $t = -0,7$ °С. На рис. 2б приведено оптическое изображение S2 L1C (уровень обработки) за 18.04.2016.

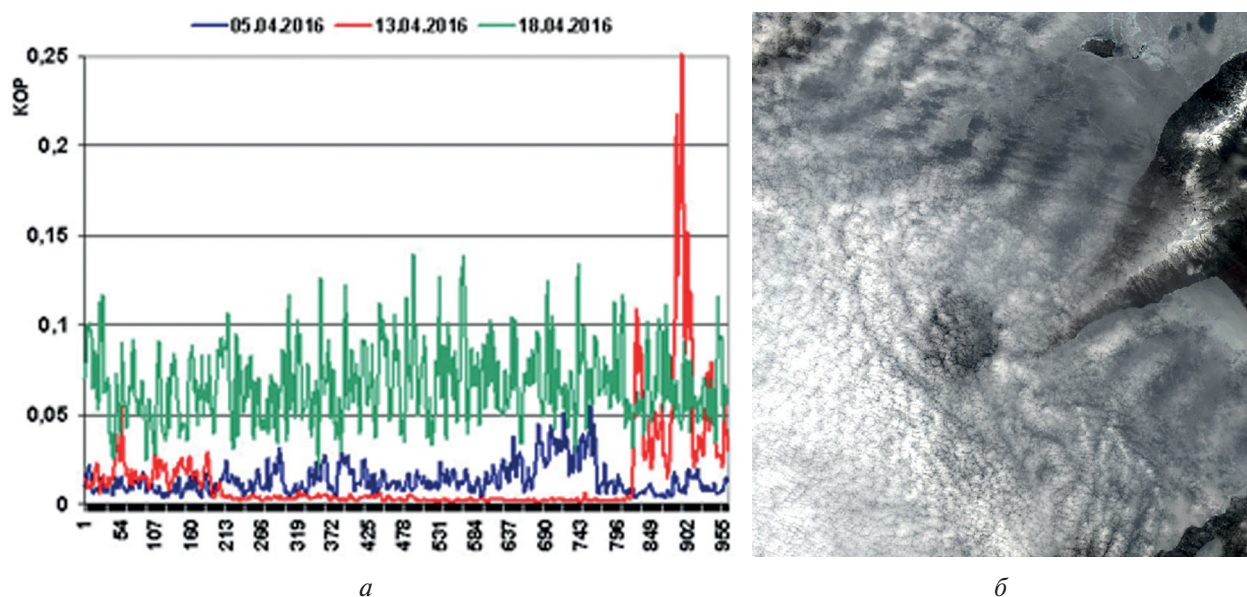


Рис. 2. Изменение значений KOP вдоль профиля для РЛИ S1 за 5, 13 и 18 апреля 2016 г. (а); L1C-изображение S2 за 18 апреля 2016 г., комбинация каналов 4–3–2, 79 % покрытия облачностью (б)

Съёмка спутником S1 района Байкала в 2016 г. осуществлялась только на согласованной поляризации VV. При отсутствии поляриметрии есть возможность интерпретировать одноканальные изображения на основе текстурных признаков Харалика (Haralick, 1979). На рис. 3 (см. с. 216) показан текстурный вариант радарных изображений рис. 1 в RGB-кодировке: красный цвет — «контраст», зелёный — «энтропия», синий — «обратный момент». Текстурные признаки позволяют дать интерпретацию изображений, а именно: гладкая поверхность —

синий цвет, перепады высот — красный, хаос с перепадами высот (сеть трещин) — оранжевый, хаос — зелёный. На текстурном изображении за 18 апреля отмечаем значительное увеличение шероховатости поверхности с перепадом высот в районе полыньи, что, скорее всего, связано с хаотическим нагромождением дрейфующего льда.

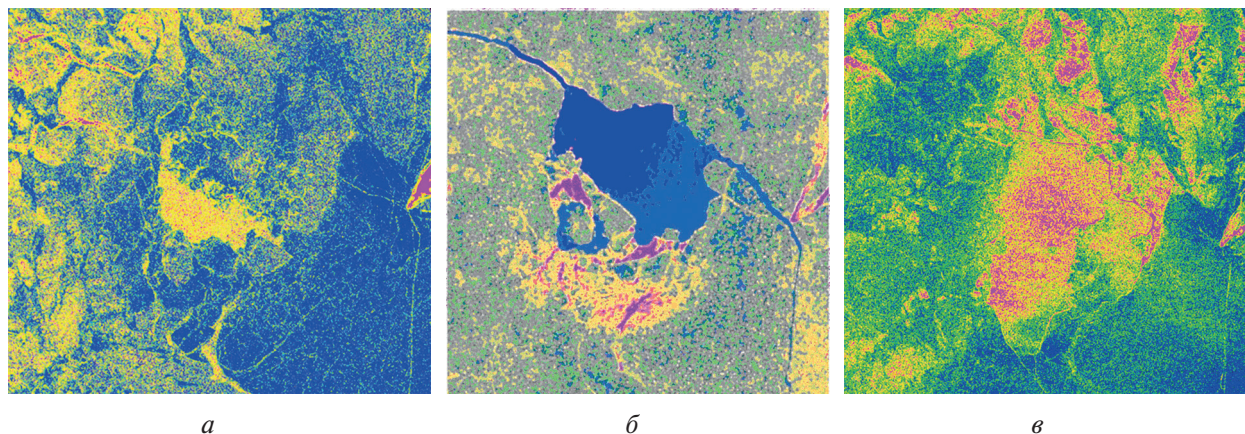


Рис. 3. Текстурные изображения: «контраст» — красный цвет, «энтропия» — зелёный, «обратный момент» — синий. Даты съёмки: *а* — 05.04.2016, *б* — 13.04.2016, *в* — 18.04.2016

Кольцевая структура у м. Нижнее Изголовье наблюдалась на снимках S2 по 21.04.2016 (<https://glovis.usgs.gov/app?fullscreen=1>). Следует отметить, что площадь кольцевой структуры в апреле 2016 г. почти в два раза (радиус кольца — порядка 4,5 км по снимку S2 за 18 апреля) превосходит площадь кольца в этом же районе в апреле 2009 г. (http://www.geol.irk.ru/baikal/baikal/krugi/baikal_ring.html).

В 2017 г. на изображениях S1 и S2 не удалось обнаружить кольцевые структуры в районе м. Нижнее Изголовье.

В апреле 2018 г. кольцевые структуры на льду появились на том же месте, что и в 2016 г., как показано на оптических снимках S2 за 23 и 28 апреля (рис. 4*а*, *б*). Радарная съёмка в 2018 г. осуществлялась с двумя поляризациями VV и VH, что позволило использовать поляриметрию для получения изображения за 26.04.2018 в комбинации каналов VV и VH (RGB-кодировка: красный цвет — VV, зелёный — VH, синий — VV/VH) (рис. 4*в*). Но на радарном изображении проблематично найти кольцевые структуры без «оптической подсказки».

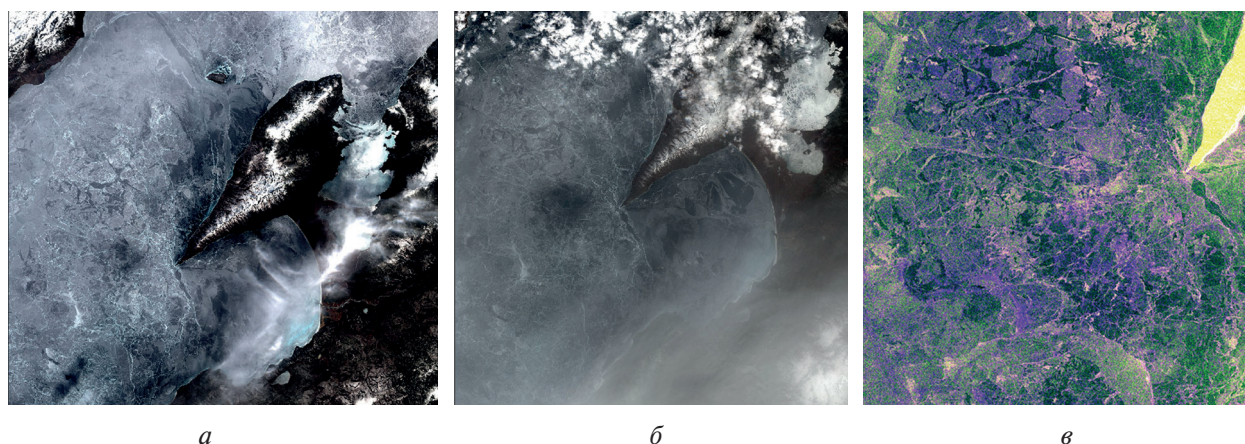


Рис. 4. Снимки S2B L1C, даты съёмки: *а* — 23.04.2018, *б* — 28.04.2018, каналы 4–3–2, м. Нижнее Изголовье; *в* — поляриметрическое изображение за 26.04.2018

Мыс Улан-Нур, апрель 2018 г.

На изображении MODIS (*рис. 5а*, дата съёмки 25.04.2018, в комбинации каналов 1–4–3 (канал 1 (0,62–0,67 мкм), ПР = 250 м; каналы 4 и 3 (0,545–0,565 и 0,459–0,479 мкм соответственно), ПР = 500 м) наблюдаются три кольцевые структуры: в районе м. Нижнее Изголовье, м. Улан-Нур и залива Посольский Сор.

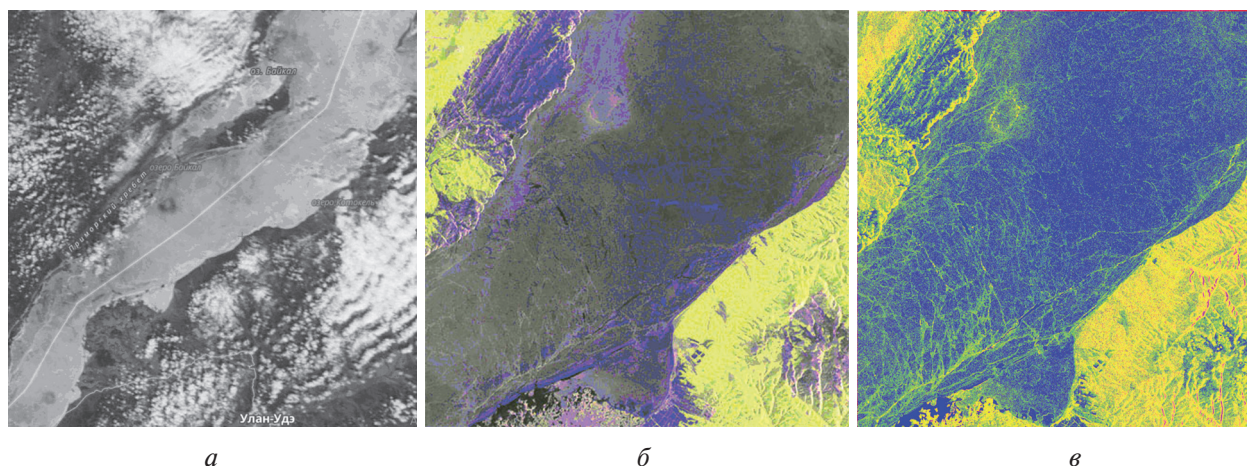


Рис. 5. Снимок MODIS за 25.04.2018 (*а*), поляриметрическое РЛИ (*б*) и текстурное изображение (*в*) за 26.04.2018

На поляриметрическом РЛИ S1 (RGB-кодировка: красный цвет — VV-поляризация, зелёный — VH, синий — VV/VH) за 26.04.2018, угол обзора 39,2°, видим кольцевую структуру с координатами центра 52,798° с. ш., 106,8055° в. д. в районе м. Улан-Нур (*рис. 5б*). Размеры кольца — порядка 4,5 км. На текстурном изображении (*рис. 5в*) визуально кольцо лучше различимо в сравнении с поляриметрическим изображением с возможностью некоторой интерпретации. А именно — контур кольца (жёлтый цвет) свидетельствует о повышенном значении контраста и энтропии, т.е. наличии перепадов высот и хаоса на фоне основного синего цвета (гладкая поверхность льда). Изображений S2 данного района без сплошной облачности найти не удалось.

Залив Посольский Сор, март, апрель 2018 г.

На *рис. 6* (см. с. 218) представлена последовательность изображений S2 с кольцевой структурой с координатами 51,9254° с. ш., 105,9647° в. д. в районе залива Посольский Сор, даты съёмки 29 марта, 8, 16 и 23 апреля 2018 г. На *рис. 7а* (см. с. 218) показано поляриметрическое изображение в RGB-кодировке, как и выше, в этом же районе, дата съёмки 19.04.2018. Распознать кольцевую структуру (показана стрелкой и выделена красной окружностью) на РЛИ проблематично (несколько светлее тон). На текстурном изображении (*рис. 7б*) в области ледового кольца отмечается более высокое значение энтропии (зелёный цвет) — повышенный хаос — в сравнении с окружением и структура лучше различима визуально в сравнении с поляриметрическим изображением. Изменения текстурных признаков вдоль профиля внутри кольца показаны на графиках *рис. 8* (см. с. 219). Наибольшие перепады значений внутри и вне кольца обнаружены у текстурного признака «энтропия».

Отметим, что в области ледового кольца у м. Улан-Нур на текстурном изображении текстурный признак «энтропия» также имеет повышенное значение.

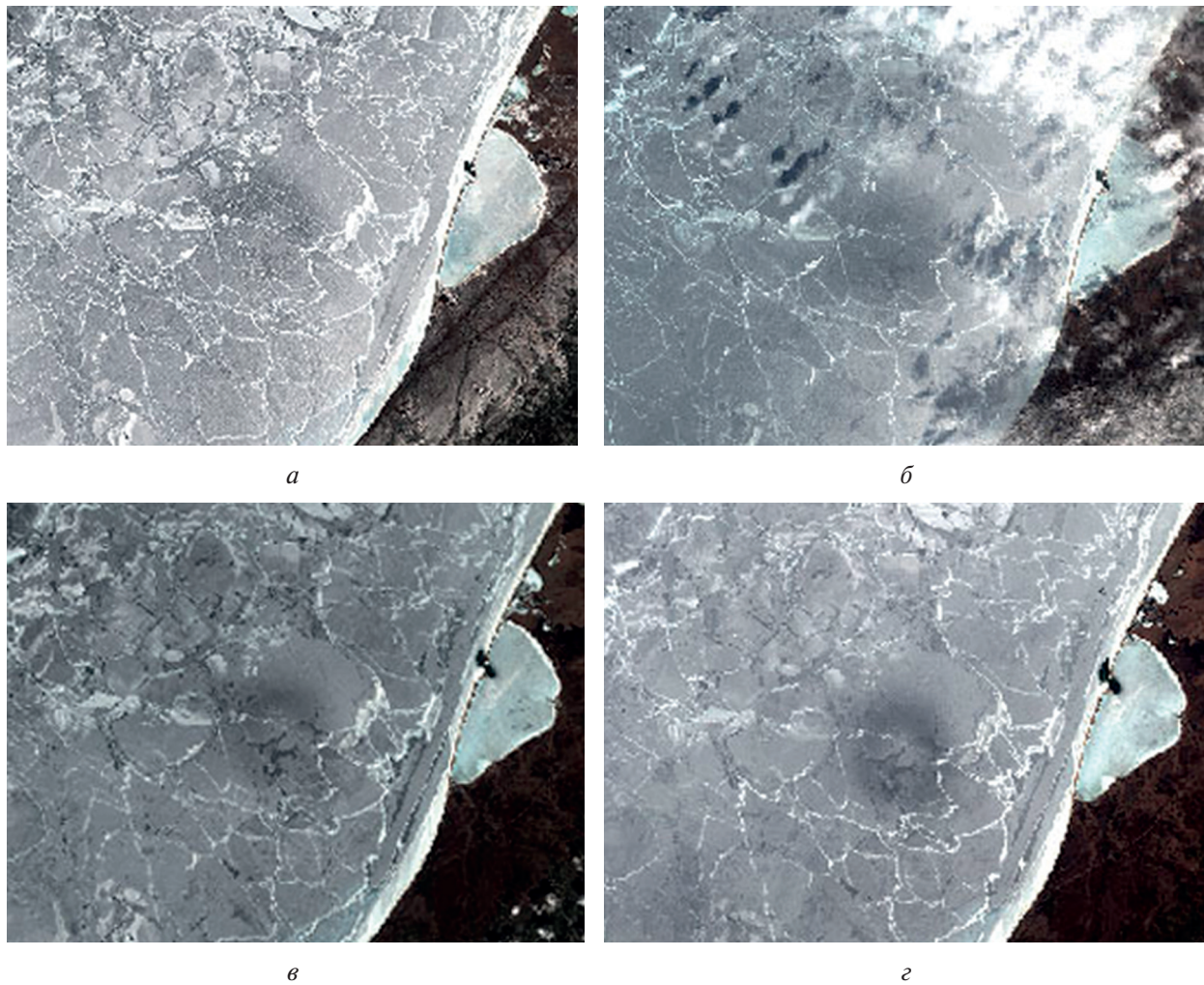


Рис. 6. Кольцевая структура в районе залива Посольский Сор по снимкам S2A MSI (MultiSpectral Instrument) L1C в марте и апреле 2018 г., комбинация каналов 4–3–2. Даты съёмки: а — 29.03.2018; б — 08.04.2018; в — 16.04.2018; г — 23.04.2018

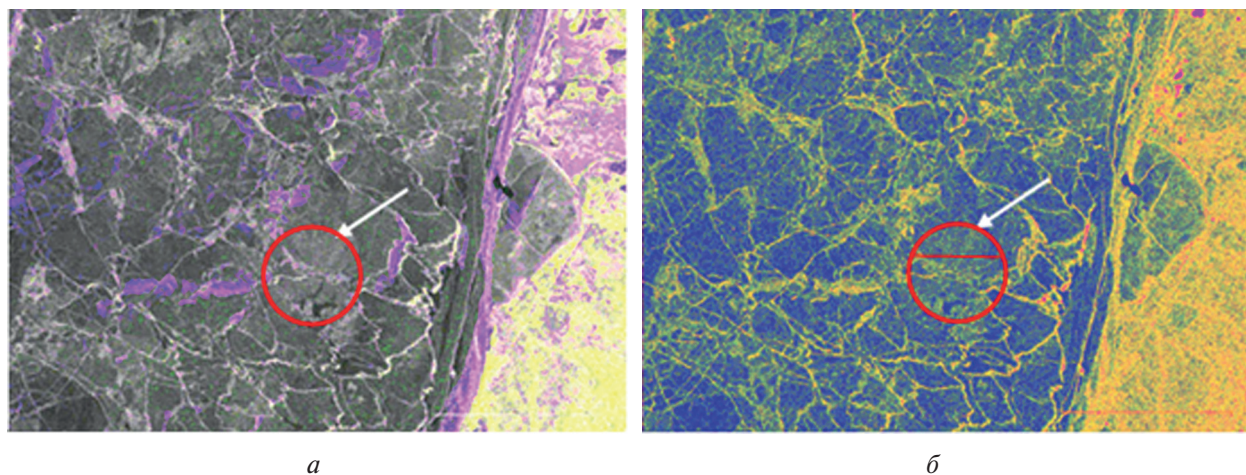


Рис. 7. Поляриметрическое (а) и текстурное (б) изображения S1 района залива Посольский Сор, дата съёмки 19.04.2018



Рис. 8. Изменение значений текстурных признаков «энтропия», «контраст» и «обратный момент» вдоль профиля внутри окружности на рис. 7б

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 (Гранин и др., 2015; Balkhanov et al., 2010; Gunin, 2014), образование кругов связано с выбросами природного горючего газа (метана) из многокилометровой осадочной толщи дна Байкала. На некоторых участках акватории выходы природного газа со дна происходят постоянно. Зимой в таких местах образуются «пропарины» диаметром от полуметра до сотен метров, где лёд очень тонкий или вообще отсутствует. Но гигантские тёмные кольца на льду Байкала размером в несколько километров, вероятно, образуются при выбросах аномально больших объёмов природного газа, связанных с сейсмической деятельностью и тектоническими движениями в Байкальской рифтовой системе. Механизм образования тёмных колец на ледяной поверхности, предположительно, состоит в следующем. Природный газ, поднимаясь со дна Байкала, воздействует на восходящий водный поток, который при подъёме закручивается силами Кориолиса из-за вращения Земли. В результате в приповерхностном слое воды подо льдом формируется круговое относительно тёплое течение, постепенно разрушающее ледяной покров снизу. Подтаявший лёд напитывается водой, и на поверхности льда проявляется тёмное кольцо (<http://www.vsp.ru/2017/10/06/bajkalskie-vihri>) (Гранин и др., 2015).

По версии Г. С. Бордонского и С. Д. Крылова (2014), кольца образуются из-за нарушения структуры льда вследствие воздействия на него переменных потоков тепла в условиях резко континентального климата, когда возникают значительные перепады дневных и ночных температур.

Авторы работы (Ivanov et al., 2016) считают главной причиной образования колец во льду Байкала подлёдные антициклонические вихри, которые возникают в определённых 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- (infrared — инфракрасный) и SAR-изображениях (Synthetic Aperture Radar — радар с синтезированной апертурой).

Переосмыслению существующих гипотез и предложению гипотезы о линзовидных вихрях как причине появления колец на льду Байкала посвящена работа (Kourgaev et al., 2016), основу которой составили натурные измерения на более чем 250 станциях в районах уже известных или возможных появлений кольцевых структур. Измерялись толщина льда, высота слоя снега, структура льда, шероховатость, вертикальный профиль температуры и проводимости до глубины 100 м, проводилась оценка течений. Все гидрографические измерения выявили линзовидные структуры в полях температуры, электропроводимости и плотности. По версии авторов (Kourgaev et al., 2016), ледовые кольца — это проявление воздействия линзовидных вихрей на поверхности льда. Антициклонические вихри под ледовыми кольцами характеризуются слабым или умеренным течением в центральной части и сильным течением в области кольца, ориентированным влево относительно касательной к границе вихря. Увеличение теплообмена между льдом и водой на границе вихря приводит к заметному

уменьшению толщины льда по сравнению с центром кольца или областями вне его. Области тонкого и, как следствие, более тёмного льда идентифицируются на спутниковых снимках как гигантские ледовые кольца.

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.

Заключение

Обработаны и проанализированы снимки кольцевых ледовых структур на Байкале, полученные с помощью радарных данных Sentinel-1 и мультиспектральных данных Sentinel-2 за март – апрель 2016–2018 гг. Кольцевые структуры были обнаружены в средней части Байкала в районах м. Нижнее Изголовье, м. Улан-Нур, залива Посольский Сор. На радарных изображениях не всегда удаётся распознать наличие кольцевой структуры. В настоящей работе только на двух S1 РЛИ: в районе м. Нижнее Изголовье 13 апреля 2016 г. и в районе м. Улан-Нур 26 апреля 2018 г., — визуально обнаружены кольцевые структуры. Текстурные признаки Харалика способны помочь обнаружению ледовых колец на радарном изображении. Так, повышенное значение текстурного признака «энтропия» в пределах круговых структур на радарном изображении указывает на наличие кольца. Мультиспектральные изображения Sentinel-2 являются необходимыми для поиска кольцевых структур, правда, здесь существует серьёзная помеха в виде облачности в момент съёмки.

Литература

1. *Бордонский Г. С., Крылов С. Д.* О природе кольцевых образований на спутниковых снимках ледяного покрова озера Байкал // Исследование Земли из космоса. 2014. № 4. С. 27–31.
2. *Гранин Н. Г., Козлов В. В., Цветова Е. А., Гнатовский Р. Ю.* Полевые исследования и некоторые результаты численного моделирования кольцевой структуры озера Байкал // Доклады Академии наук. 2015. Т. 461. № 1. С. 316–320.
3. *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. V. 55(9). P. 1266–1269.
4. *Gunin V. I.* Assessment of gas-hydrothermal activity of the Baikal rift in the lake area from numerical experiment data // Geodynamics and Tectonophysics. 2014. V. 5(3). P. 763–775. DOI: 10.5800/GT-2014-5-3-0153.
5. *Haralick R. M.* Statistical and structural approaches to texture // Proc. IEEE. 1979. V. 67(5). P. 786–804.
6. *Ivanov A., Evtushenko N., Filimonova N., Terleeva N.* Atmospheric and oceanic phenomena in Lake Baikal visible from space on SAR and optical images // Proc. ESA Living Planet Symp. Prague, Czech Republic, 9–13 May 2016. 2016. ESA SP V. 740. P. 221.
7. *Kouraev A., 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 // Limnology and Oceanography. 2016. V. 61. P. 1001–1014. DOI: 10.1002/lno.10268.

Observation of ice rings on Lake Baikal using Sentinel-1, 2 images in spring 2016–2018

N. V. Rodionova

*V.A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS,
Fryazino Branch, Fryazino 141190, Russia
E-mail: rnv@ire.rssi.ru*

The paper analyzes images of ring structures on Lake Baikal ice derived from radar data of Sentinel-1 C-band and multispectral data of Sentinel-2 with a spatial resolution of 10 meters of March and April, 2016–2018. Joint processing of radar and optical images gives a significant advantage in the observation of ice rings. The advantage of radar sensing is high spatial resolution and independence of weather and time of day. Cloudiness and limited sensing time are a serious obstacle in obtaining high-quality optical images. But it is more difficult to recognize the ring structure on a radar image than on an optical one due to different physical mechanisms of image formation. Ring structures in the images are detected in the area of Cape Nizhneye Izgoloviye of the Saint Nose peninsular, Cape Ulan-Nur and Gulf Posolsky Sor. In this work, only in two radar images ring structures were visually detected: in the area of Cape Nizhneye Izgoloviye on April 13, 2016, and in the area of Cape Ulan-Nur on April 26, 2018. Texture features of Haralick can help detecting ice rings in a radar image. Sentinel-2 optical images are necessary to detect ring structures, but presence of clouds at the time of sensing is a serious problem.

Keywords: Sentinel-1 C-band radar data, Sentinel-2 optical data, ice rings on Lake Baikal, backscattering coefficient

Accepted: 01.07.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-213-221

References

1. Bordonskii G. S., Krylov S. D., O prirode kol'tsevykh obrazovaniy na sputnikovykh snimkakh ledyanogo pokrova ozera Baikal (On the nature of ring-like structures on satellites images of Lake Baikal ice cover), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 4, pp. 27–31.
2. Granin N. G., Kozlov V. V., Tsvetova E. A., Gnatovsky R. Yu., Field studies and some results of numerical modeling of a ring structure on Baikal ice, *Doklady Earth Sciences*, 2015, Vol. 461, No. 1, pp. 316–320.
3. 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, Vol. 55, No. 9, pp. 1266–1269.
4. Gunin V. I., Assessment of gas-hydrothermal activity of the Baikal rift in the lake area from numerical experiment data, *Geodynamics and Tectonophysics*, 2014, Vol. 5, No. 3, pp. 763–775, DOI: 10.5800/GT-2014-5-3-0153.
5. Haralick R. M., Statistical and structural approaches to texture, *Proc. IEEE*, 1979, Vol. 67, No. 5, pp. 786–804.
6. Ivanov A., Evtushenko N., Filimonova N., Terleeva N., Atmospheric and oceanic phenomena in Lake Baikal visible from space on SAR and optical images, *Proc. ESA Living Planet Symp.*, Prague, Czech Republic, 9–13 May 2016, 2016, ESA SP V. 740, p. 221.
7. Kouraev A., 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, *Limnology and Oceanography*, 2016, Vol. 61, pp. 1001–1014, DOI: 10.1002/lno.10268.