



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, г. Фрязино*

**XVII Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы ДЗЗ из космоса»
(11-15 ноября 2019, ИКИ, Москва)**



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

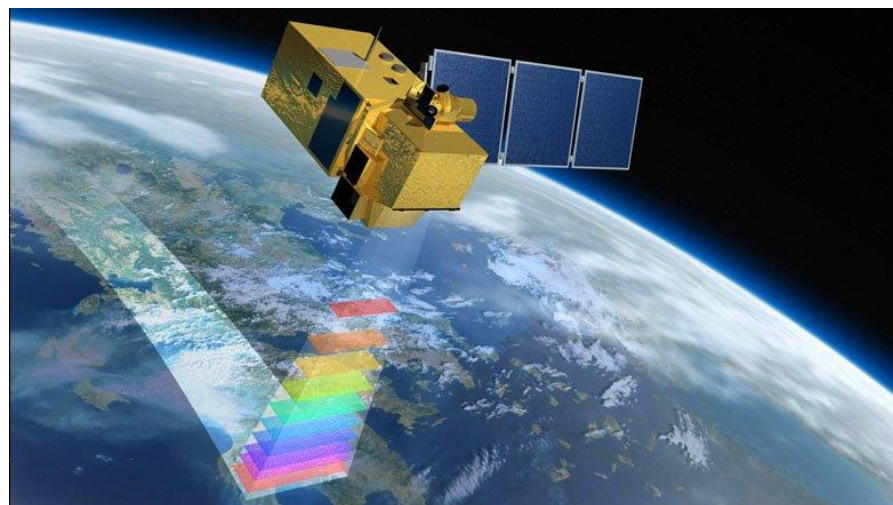


Рис. 1. Европейские спутники ДЗЗ Sentinel 1 и Sentinel 2

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 6 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.

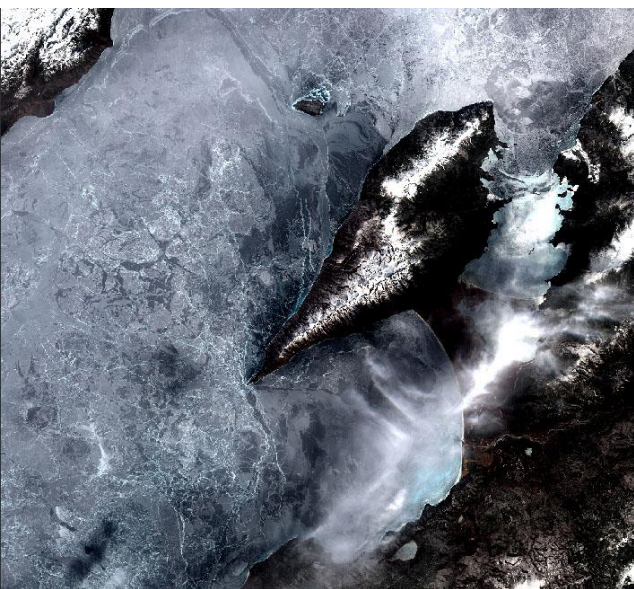
Спутник ESA Sentinel 2A запущен в июне 2015 года, второй Sentinel 2B в марте 2017 года. Периодичность мультиспектральной съемки каждым спутником составляет 10 дней, а при работе двух аппаратов – 5 дней. В мультиспектральной камере 13 каналов с разным пространственным разрешением (ПР) от 10 до 60 метров. 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.



П-ов Святой Нос, мыс Нижнее Изголовье

Апрель 2018

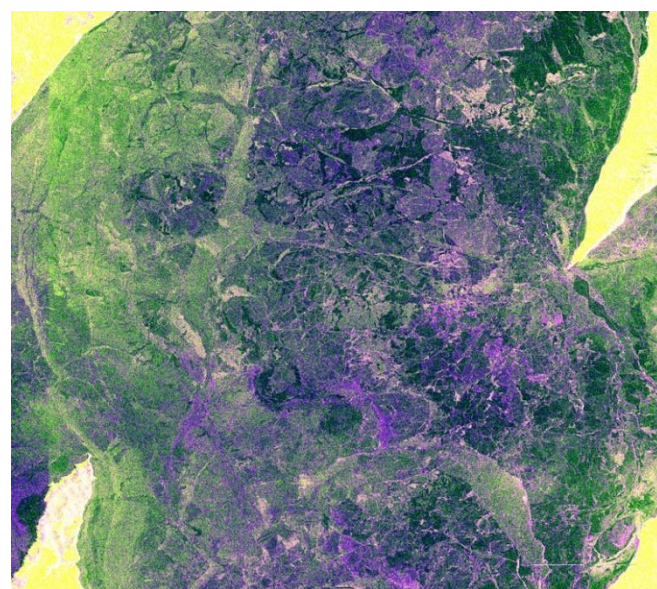
В апреле 2018 года кольцевые структуры на льду появились у мыса Н. Изголовье на том же месте, что и в предыдущие годы. На рис. 2 (а), (б) показаны снимки S2 за 23 и 28 апреля 2018 года в комбинации каналов 4 3 2, и на рис. 2 (в) приведено поляриметрическое изображение за 26 апреля 2018 года в комбинации 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’.



(а)



(б)



(в)

Рис. 2. 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



Апрель 2019

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

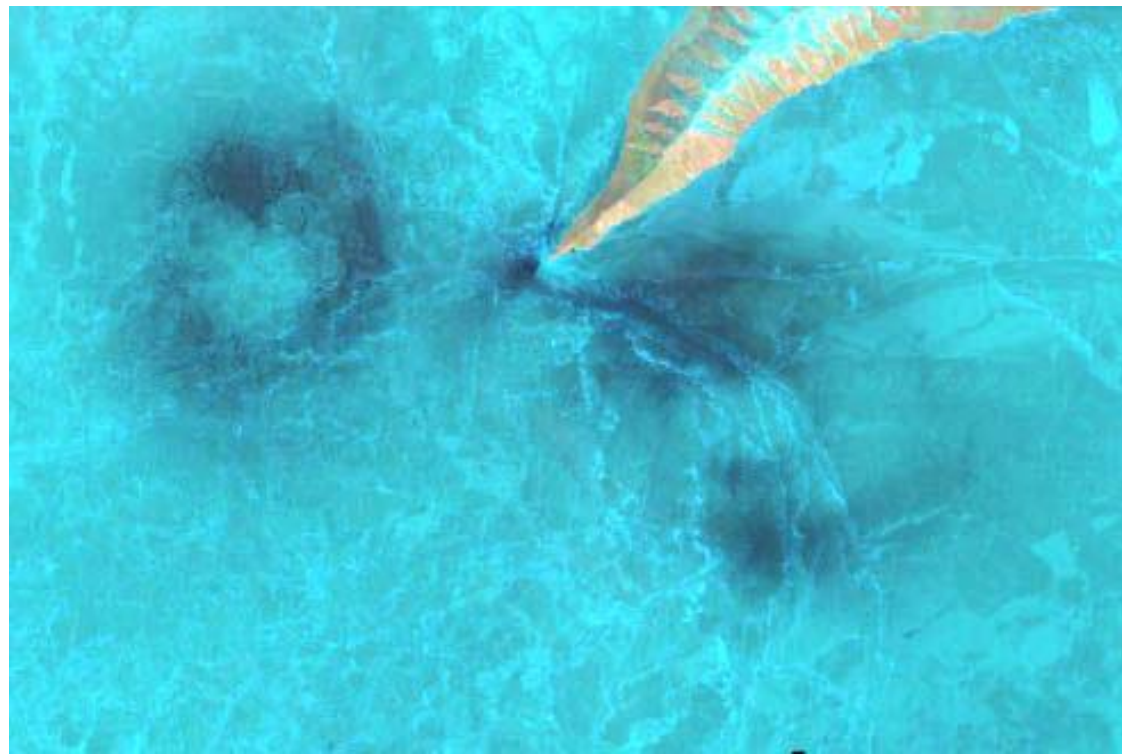
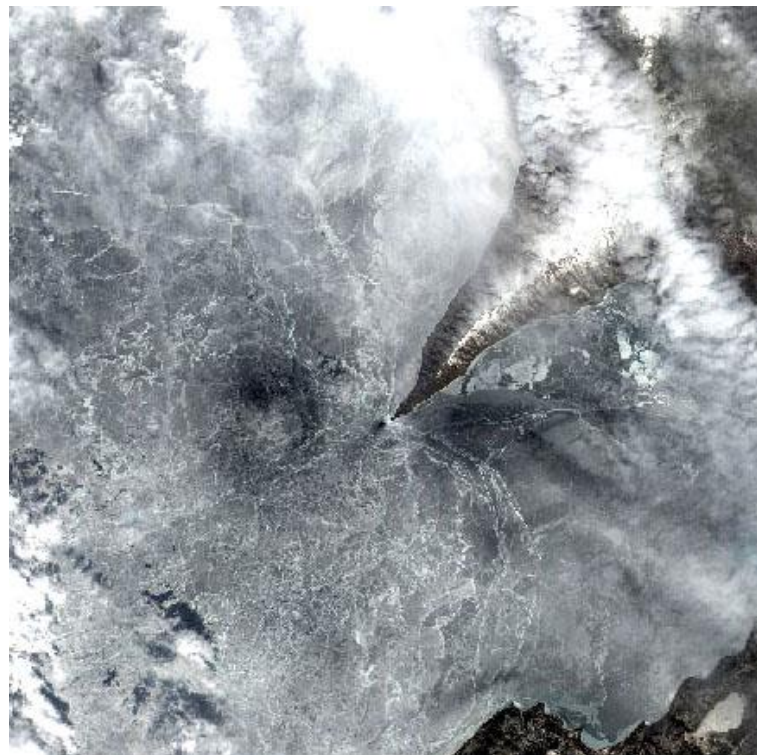


Рис. 3. Снимки S2B L1C, дата съемки 23 и 28 апреля 2019 (слева и справа) каналы 4-3-2



Апрель 2019

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



Рис. 4. Поляриметрическое изображение, дата съемки 3.5.2019, угол обзора 35°



Малое Море

Апрель 2019

Малое Море- пролив, отделенный от большого Байкала островом Ольхон. 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. 5 показано поляриметрическое изображение за 9.4.2019, угол обзора 36° , координаты центра кольца 53.46° с.ш, 107.7° в.д., диаметр кольца порядка 17 км.

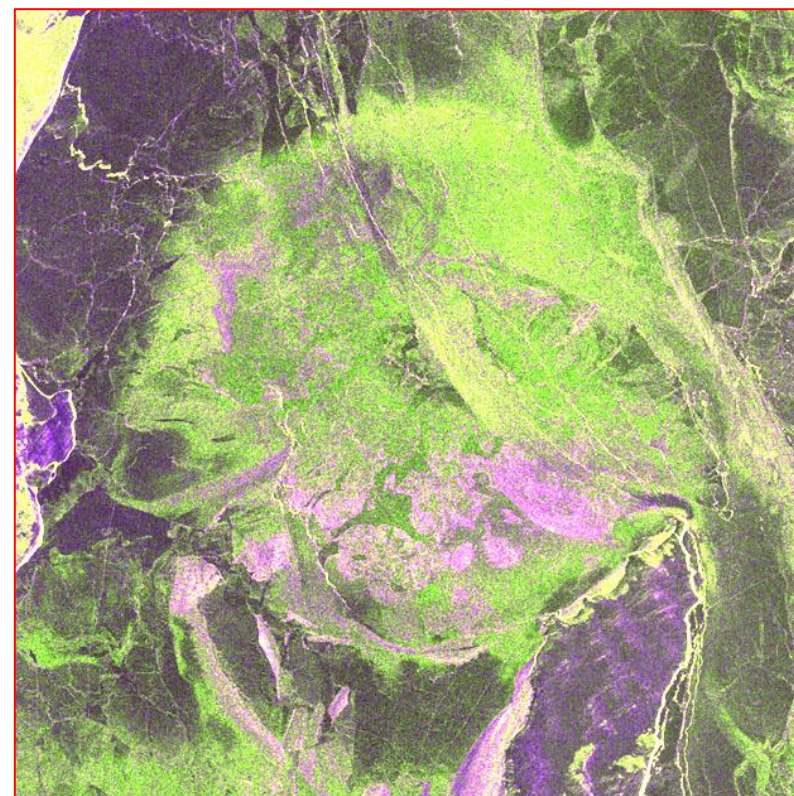
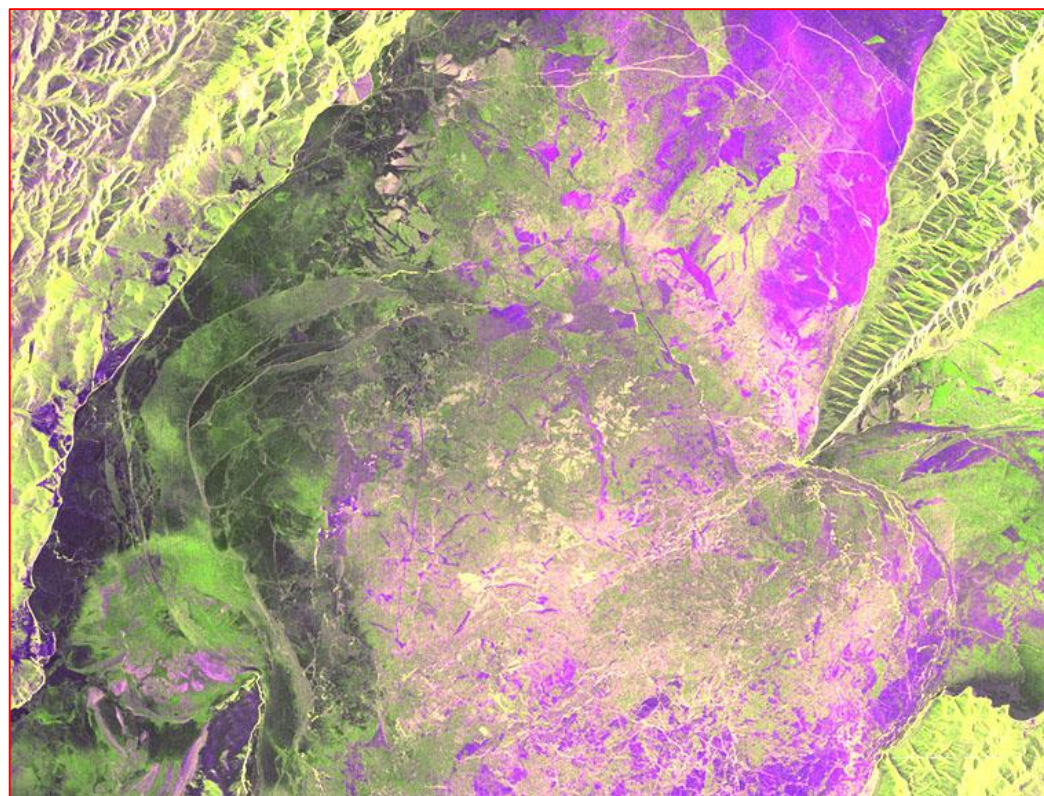


Рис. 5. Поляриметрическое изображение кольца в северной части Малого Моря за 9.4.2019, VV-red, VH-green, VV/VH-blue. Размеры кольца 17.6 км по горизонтали и 15.5 км по вертикали.

4 Апреля 2019

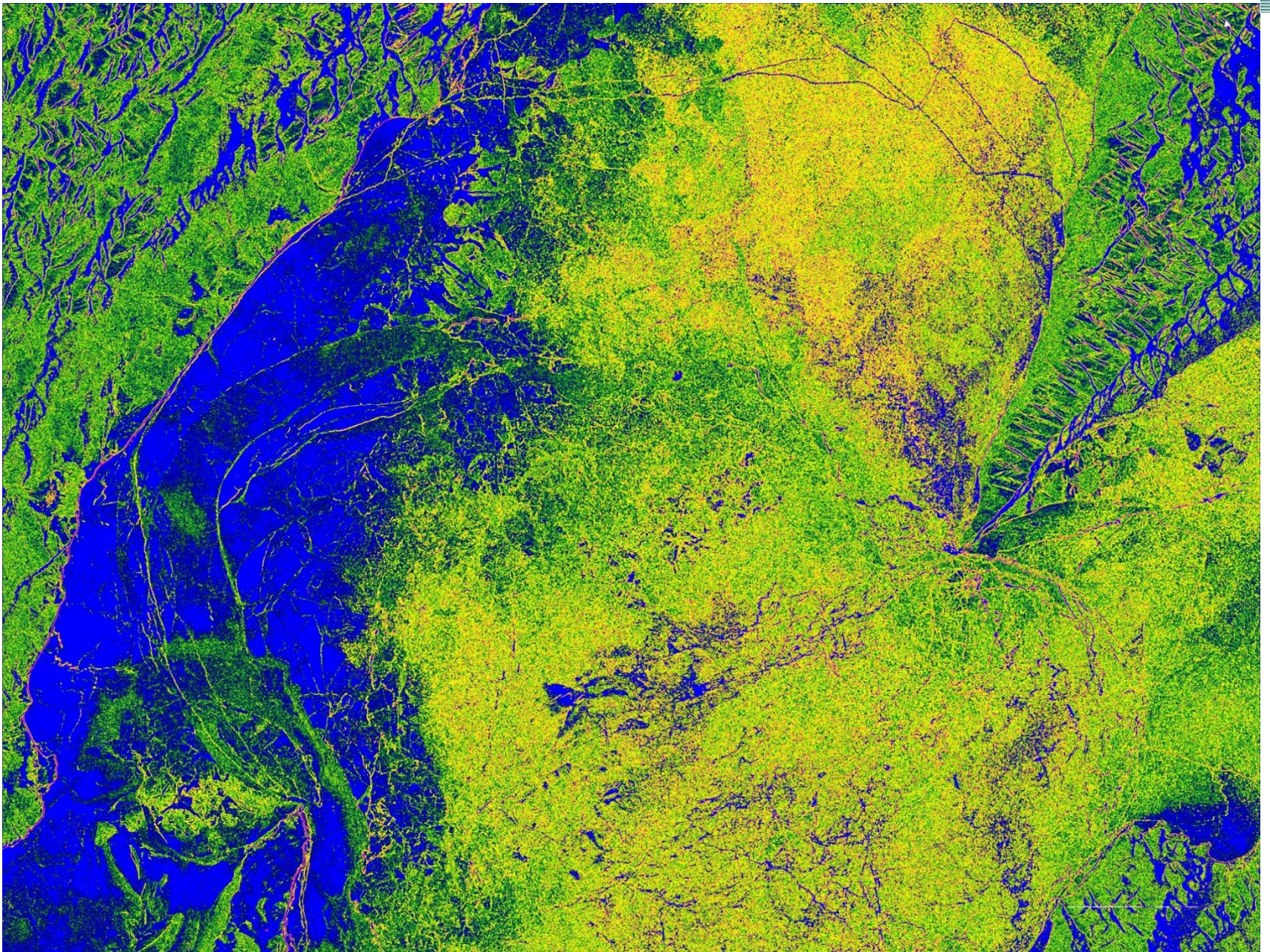


Рис. 6. Текстурное изображение после фильтрации спеклов VV поляризация



4 Апрель 2019

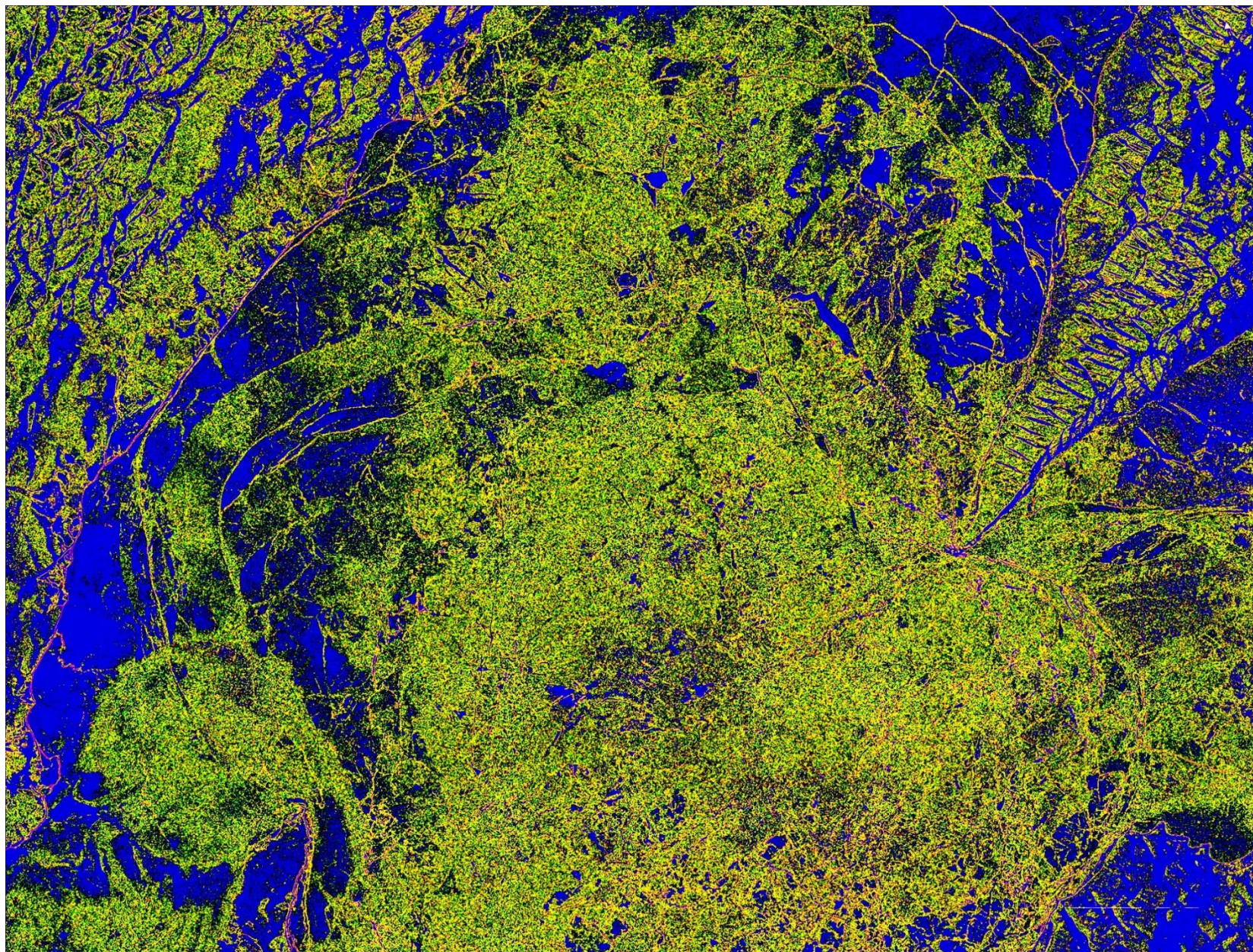


Рис.7. Текстурное изображение после фильтрации спеклов VH поляризации



Малое Море

Апрель 2019

На рис. 8 показана структура внутри кольца на радарных изображениях для поляризаций VV и VH.

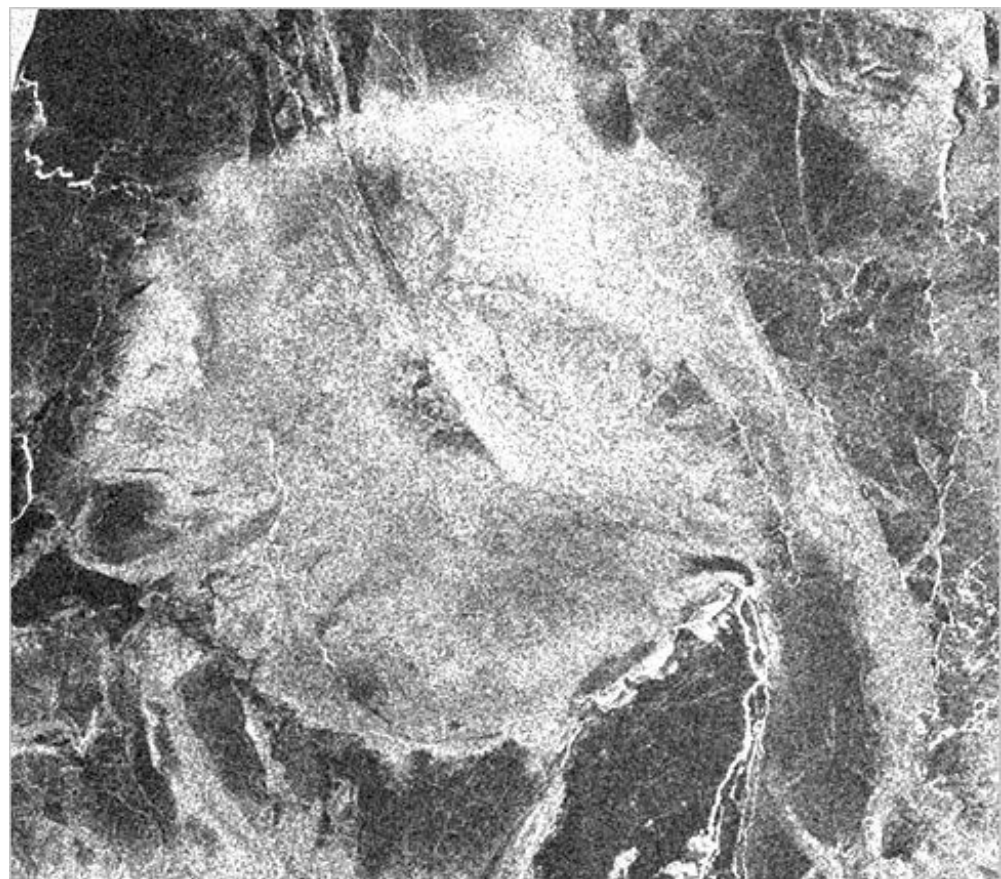


Рис. 8. Радарные изображения кольца поляризации VV и VH дата съемки 9 апреля 2019 года.



Малое Море

Апрель 2019

На рис. 9 показана структура внутри кольца на радарных изображениях для поляризаций VV и VH.

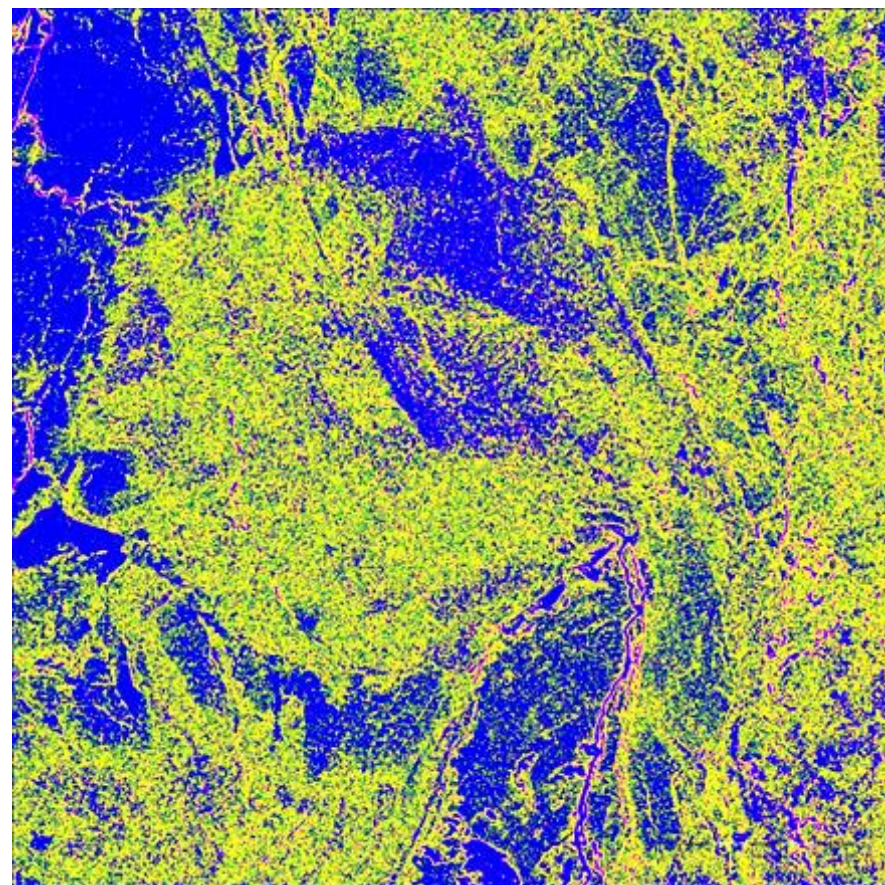
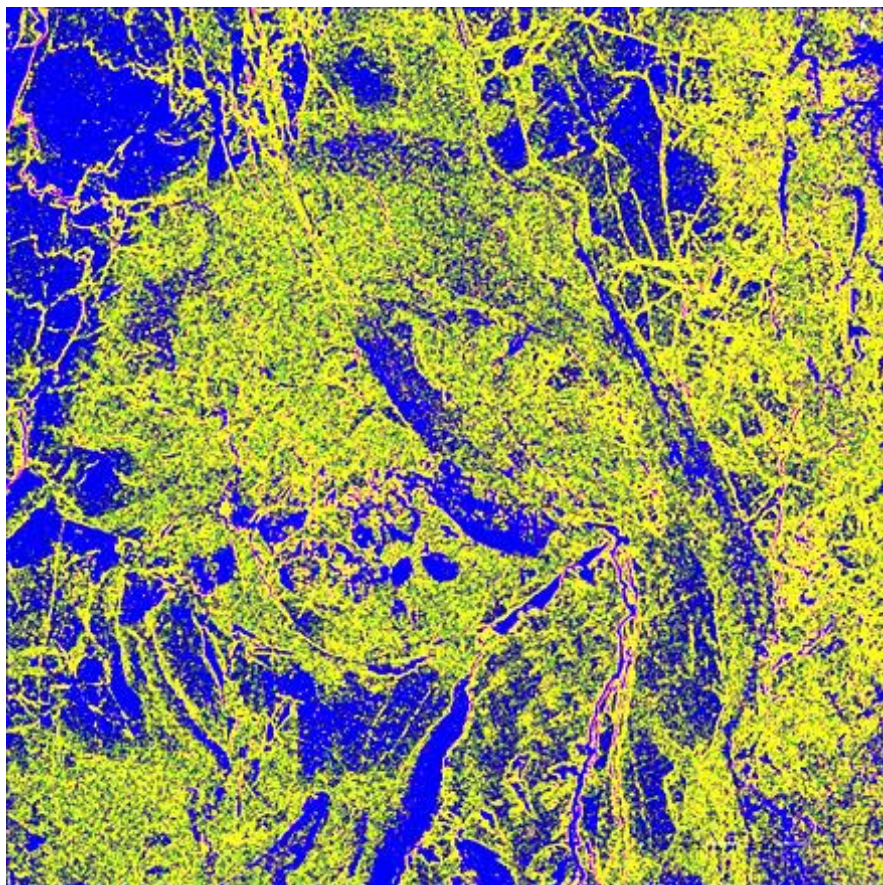


Рис. 9. Текстурные изображения кольца поляризации VV и VH дата съемки 9 апреля 2019 года после фильтрации спеклов в RGB кодировке: red- contrast, green –entropy, blue-asm



*Развитие кольцевых структур в районе Малого моря и мыса Н. Изголовье
по данным S1*

Апрель 2019

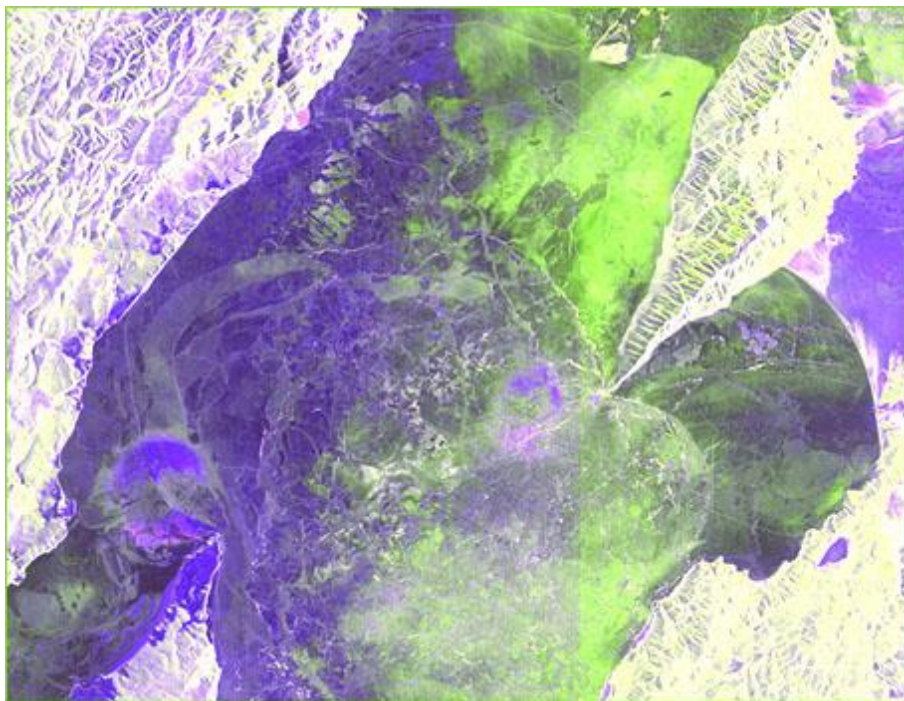
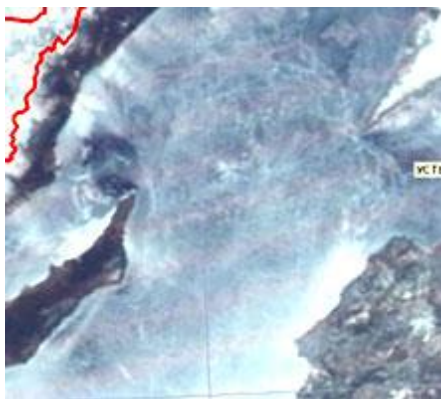


Рис. 10. Поляриметрические изображения за 16.4.2019 и 3.5.2019, видны кольца у мыса Н. Изголовье и Малого моря



*Развитие кольцевых структур в районе Малого моря и мыса Н. Изголовье
по данным Aqua и Terra MODIS*

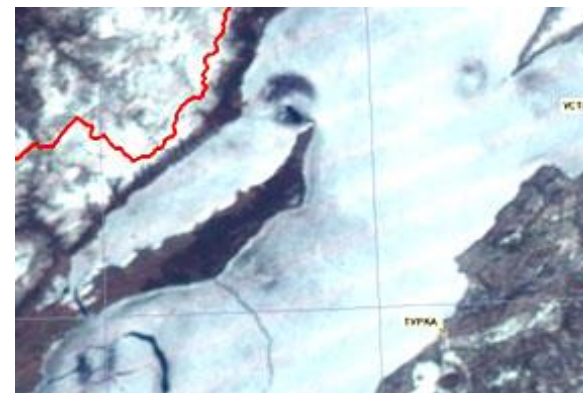
Апрель 2019



18.4.2019 Terra 1-4-3



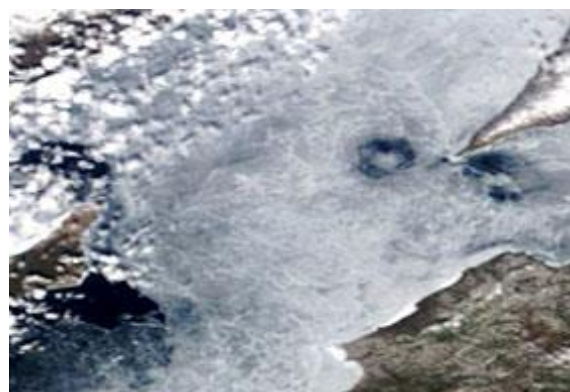
22.4.2019 Terra 1-4-3



24.4.2019 Terra 1-4-3



29.4.2019 Terra 2-1-3



29.4.2019 Aqua



1.5.2019 Aqua

Рис. 11. Снимки Aqua и Terra MODIS в апреле 2019 года



Кольцевые структуры наблюдались в 2019 году также с восточной стороны Ольхона. На рис. 12 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.

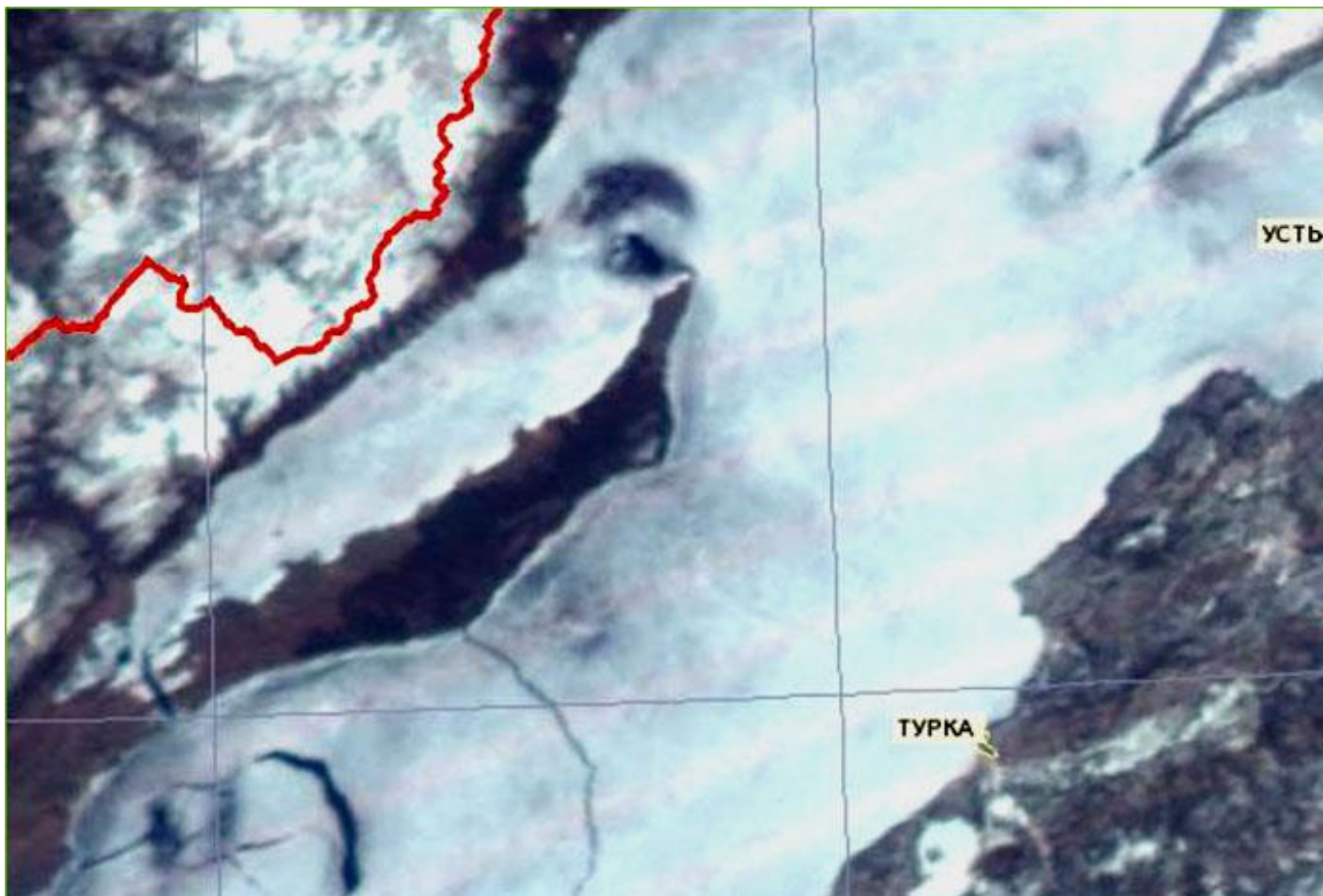
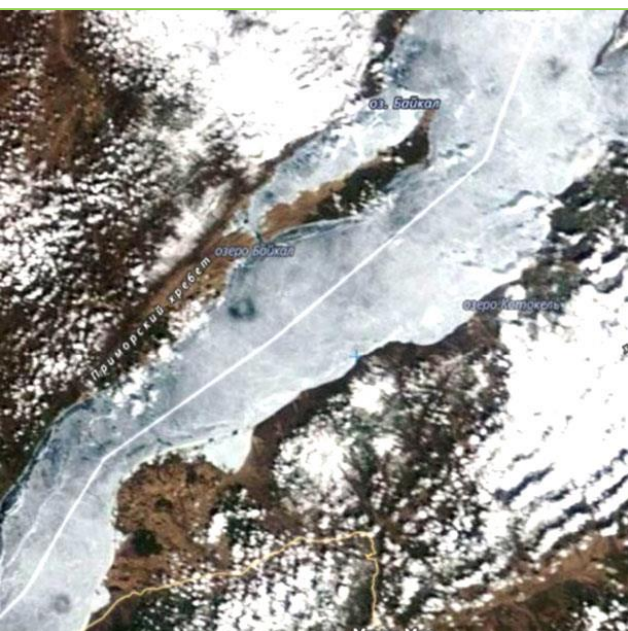


Рис.12. Terra MODIS изображение за 24.4.2019.

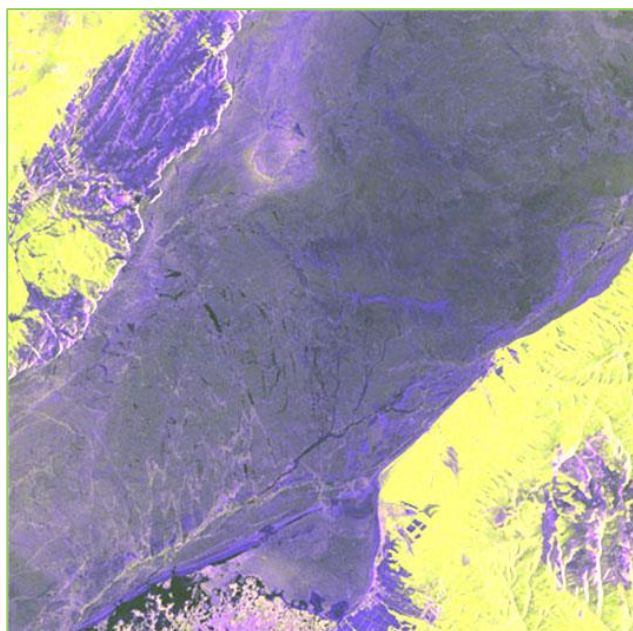


На изображении MODIS (рис. 13а) дата съемки 25.4.2018 в комбинации каналов 1-4-3 (каналы 1 и 2 (0.62-0.67 мкм и 0.841-0.876 мкм, соответственно), ПР=250 м; канал 4 (0.545-0.565), ПР =500м) наблюдаются три кольцевые структуры: в районе мыса Н. Изголовье, мыса Улан-Нур и залива Посольский Сор.

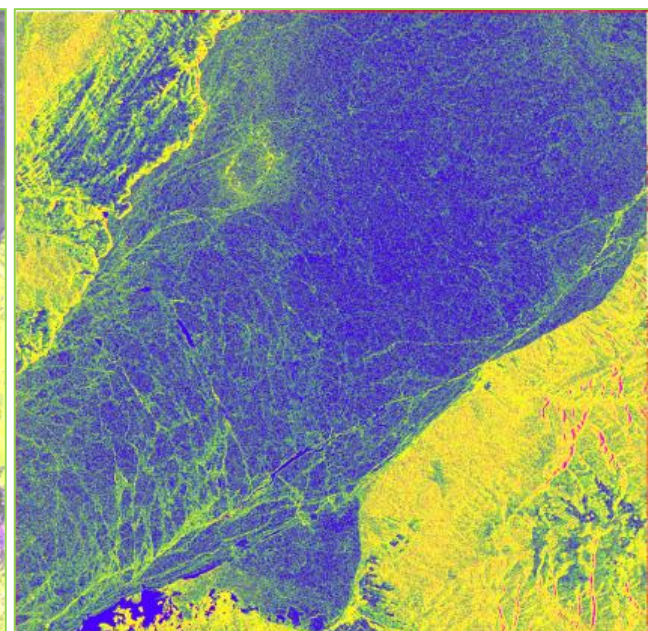
На S1 поляриметрическом РЛИ (RGB кодировка: красный цвет- VV поляризация, зеленый цвет – VH поляризация, синий цвет – VV/VH) за 26.4.2018, угол обзора 39.2°, видим кольцевую структуру с координатами центра 52.798°с.ш., 106.8055°в.д. в районе мыса Улан-Нур (рис. 13б). Размеры кольца порядка 4.5 км. На текстурном изображении (рис. 13в) (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. о наличии перепадов высот и хаоса на фоне основного синего цвета (гладкая поверхность льда).



(а)



(б)



(в)

Рис. 13. (а) снимок MODIS, дата съемки 25.4.2018; (б)- S1 поляриметрическое и (в) текстурное изображение за 26.4.2018.



Залив Посольский Сор, март, апрель 2018



На рис. 14 показана последовательность изображений S2 с кольцевой структурой с координатами 51.9254⁰с.ш., 105.9647⁰в.д. в районе залива Посольский Сор, даты съемки 29 марта, 8, 16 и 23 апреля 2018 года. На рис. 15 показано поляриметрическое изображение этого района, дата съемки 19.4.2018. Распознать кольцевую структуру (показана стрелкой и выделена окружностью) на РЛИ проблематично. На текстурном изображении (рис. 15) в области ледового кольца отмечается повышенное значение ‘энтропии’ (зеленый цвет) – повышенный хаос, 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.

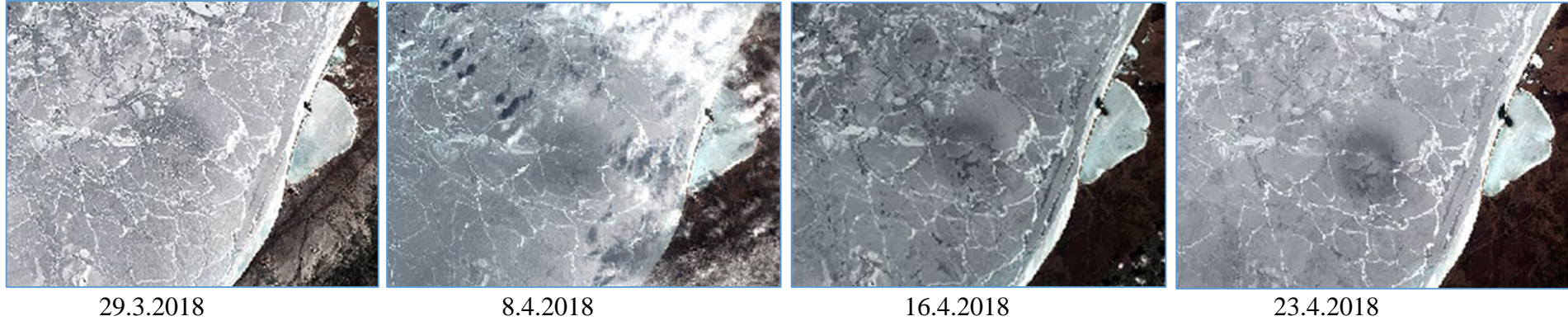


Рис. 14. Кольцевая структура в районе залива Посольский Сор по снимкам S2A MSI L1C в марте и апреле 2018 года, комбинация каналов 4-3-2.

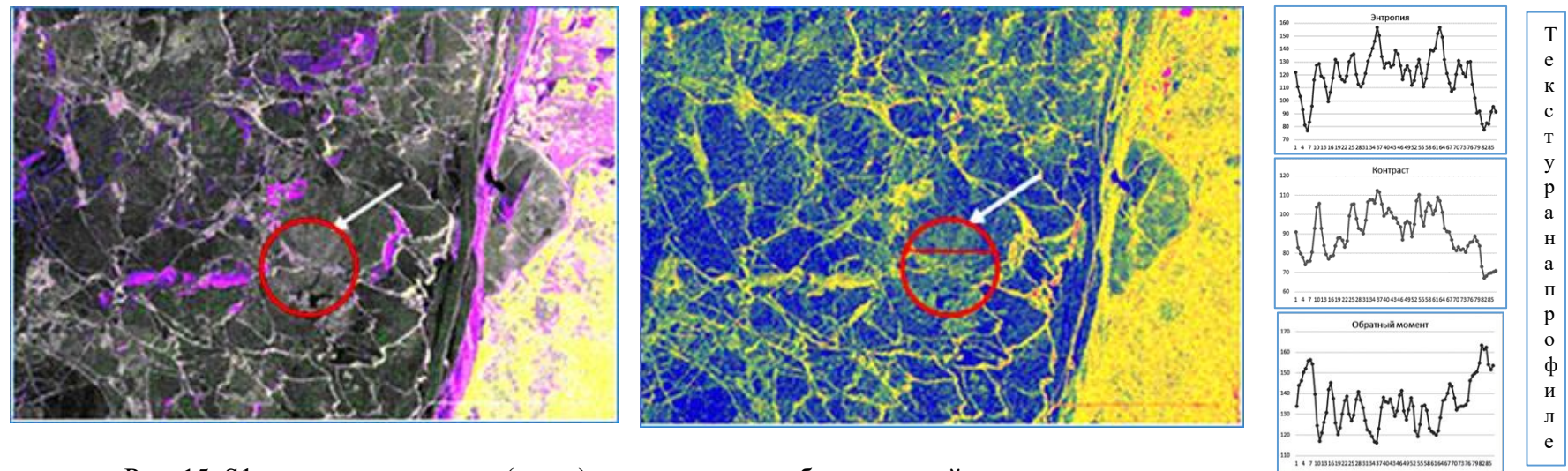


Рис. 15. S1 поляриметрическое (слева) и текстурное изображения района залива Посольский Сор, дата съемки 19.4.2018.



Слюдянка, апрель 2019



На рис. 16 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.

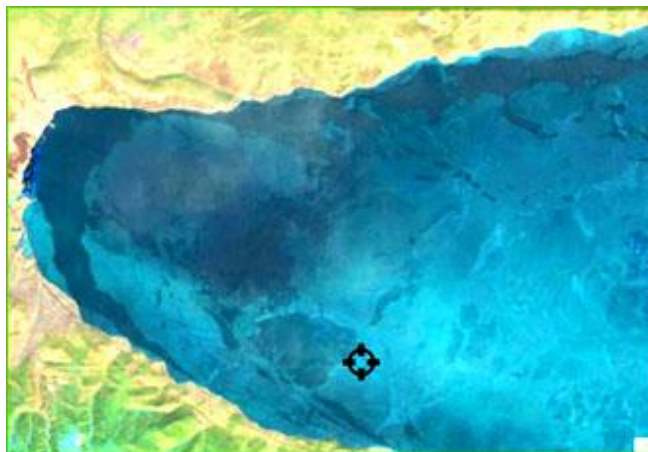


Рис. 16. S2 изображения за 14.4.2019,

(сайт glovis)

29.4.2019

1.5.2019.

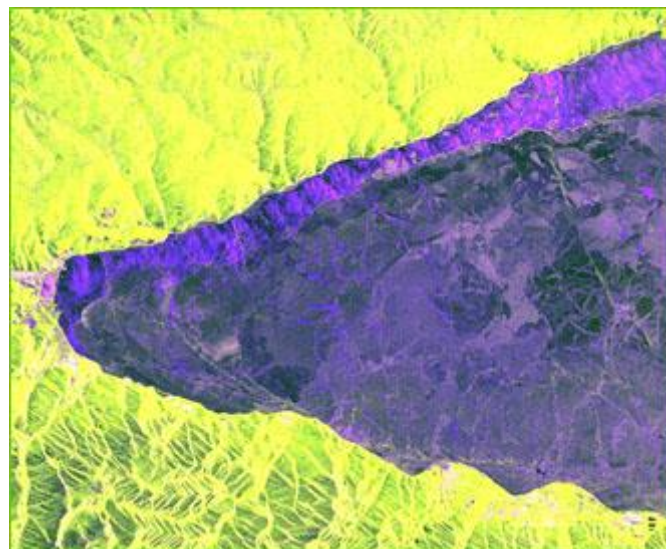
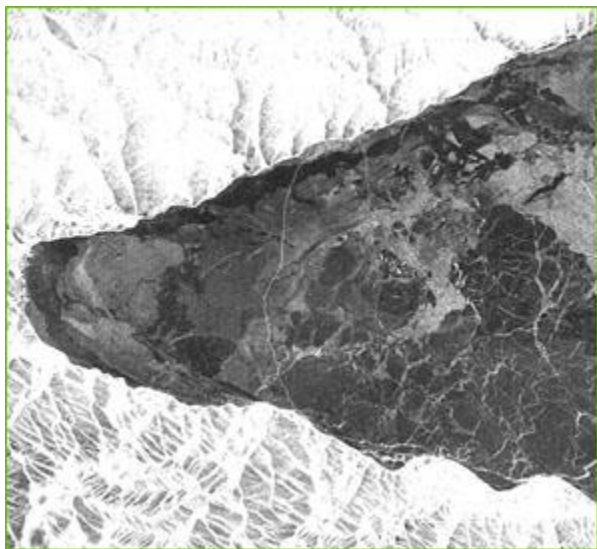


Рис. 17. S1 изображение за 19.4.2019 VV поляризация и поляриметрическое изображение за 1.5.2019

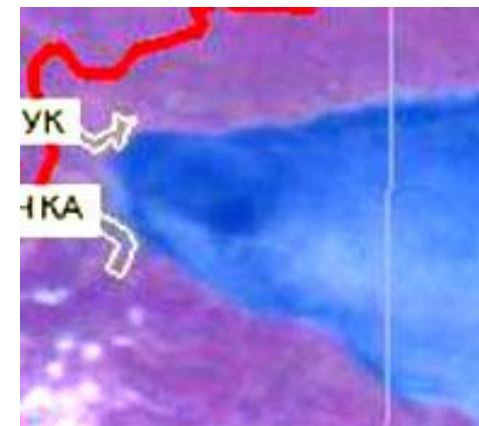


Рис. 18. Снимок Terra 2-1-3 за 29.4.2019 [10]



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].

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 Иванов и др. [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.

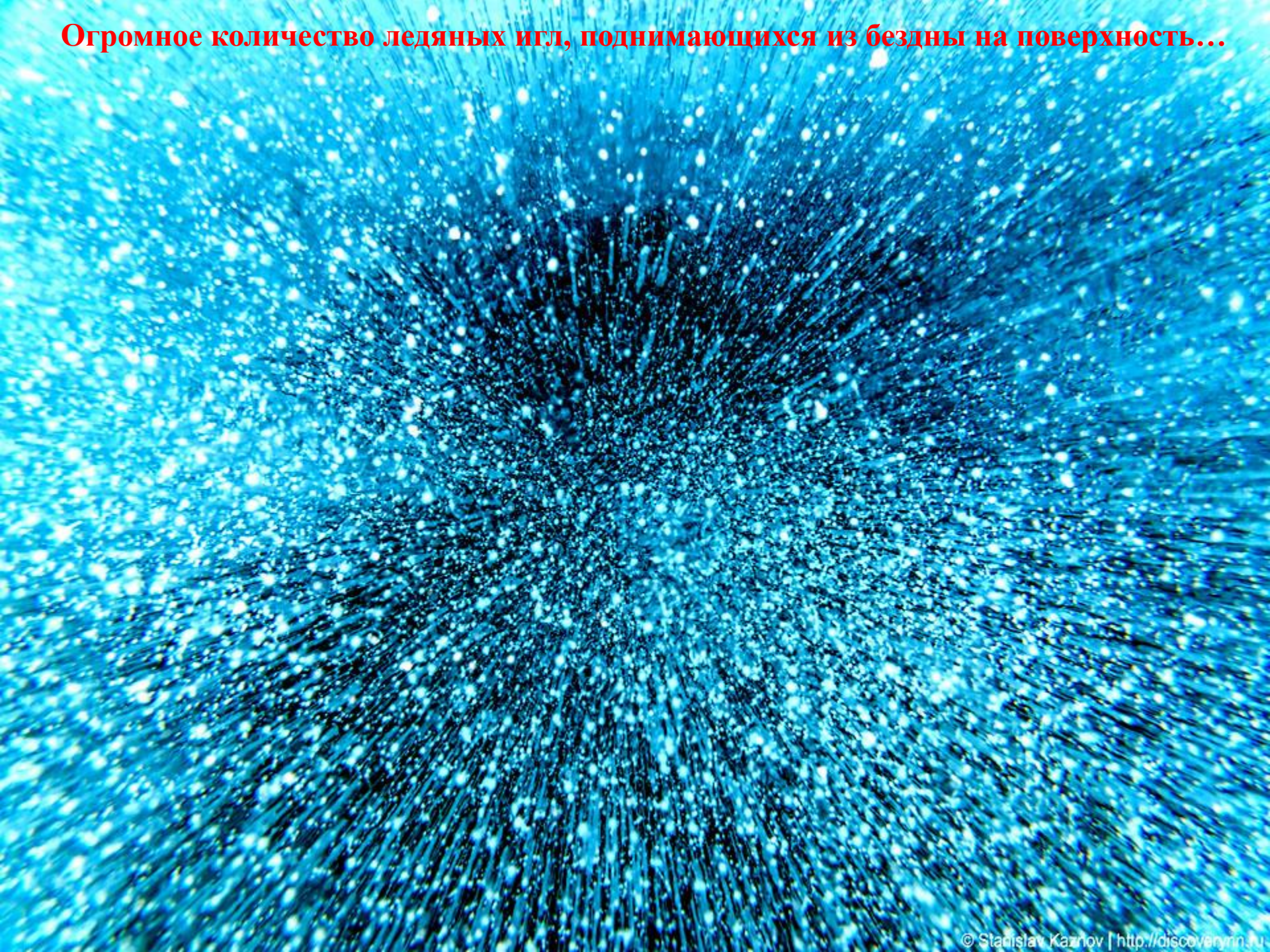
Интересный эффект дают замерзшие в воде пузыри, кислорода и метана. Они похожи на иголки, гвоздики забитые по самую шляпку в лед или огромные пузыри, замерзшие в ледяной пучине! Эффект получается при гниении растений на дне озера в период его замерзания. Для наилучшего результата наблюдений надо отправляться на остров Ольхон и окрестности Малого моря.



Фото Станислава Казнова



Огромное количество ледяных игл, поднимающихся из бездны на поверхность...





Это уже пузыри метана. Их можно наблюдать на озерах острова Ольхон. Здесь пузыри представляют из себя плоские блины различного размера и толщины.







An aerial photograph of a vast, frozen body of water, likely a lake or sea. The ice is a deep, clear blue, with a complex network of white, snow-like veins and cracks crisscrossing the surface. The sun is positioned in the upper center of the frame, creating a bright, multi-pointed starburst effect that radiates across the sky and reflects on the ice. The horizon is visible in the distance, with a dark, forested landmass on the right side. The overall atmosphere is serene and majestic.

СПАСИБО!

Литература

1. 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.
10. http://www.geol.irk.ru/dzz/bpt/ice/bpt_ksm.htm