

Алгоритм мониторинга ледяного покрова внутренних водоемов на основе данных двухчастотного дождевого радиолокатора

В.Ю. Караев, Е.С. Сорокин, Ю.А. Титченко, М.А. Панфилова, Г.Н. Баландина, Е.М. Мешков, Д.А. Ковалдов

ФГБНУ ФИЦ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»
603950, г. Н.Новгород, ул. Ульянова, 46
E-mail: volody@ipfran.ru

Дистанционное зондирование является важным источником информации о земной поверхности и его значение постоянно возрастает. В ходе предыдущих исследований было показано, что двухчастотный дождевой радиолокатор (Dual-frequency Precipitation Radar - DPR), установленный на спутнике GPM (Global Precipitation Mission), является эффективным инструментом для исследования внутренних водоемов. Проведенные исследования показали, что во всем диапазоне углов падения (за исключением диапазона $\pm 2.6^\circ$) радиолокационный контраст «вода/суша» является достаточно высоким и отсутствует контраст для случая «лед/суша». В ходе исследования был разработан алгоритм для автоматического определения присутствия льда на внутренних водоемах. В алгоритме анализируются разрезы радиолокационного изображения для выбранного угла падения (вдоль направления полета). Для всех углов падения вычисляется радиолокационный контраст в окрестности русла реки и определяются «пороговые» значения для каждого угла падения. В разработанном алгоритме превышение порогового значения говорит об отражении от водной поверхности. Была разработана процедура формирования радиолокационного изображения выбранного участка на основе последовательных радиолокационных изображений, что обеспечивает сплошное покрытие исследуемой области.

Ключевые слова: двухчастотный дождевой радиолокатор, внутренние водоемы, формирование и разрушение ледяного покрова, алгоритм обработки

An algorithm for monitoring ice cover in inland waters based on dual-frequency precipitation radar data

V.Yu. Karaev, E.S. Sorokin, Yu.A. Titchenko, M.A. Panfilova, G.N. Balandina, E.M. Meshkov, D.A. Kovaldov

FGBNU FIC “Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences”

Remote sensing is an important source of information about the Earth's surface, and its importance is constantly growing. Previous studies have shown that the Dual-Frequency Precipitation Radar (DPR) installed on the Global Precipitation Mission (GPM) satellite is an effective tool for studying inland waters. These studies revealed that the water/land radar contrast is sufficiently high across the entire range of incidence angles (except for the $\pm 2.6^\circ$ range), while there is no contrast for ice/land. An algorithm for automatically detecting the presence of ice on inland water bodies was developed during the study. The algorithm analyzes the sections of the radar image along a selected incidence angle (along the flight direction). For all incidence angles, the radar contrast in the vicinity of the riverbed is calculated, and threshold values are determined for each incidence angle. In the developed algorithm, exceeding the threshold value indicates reflection from the water surface. A procedure was developed for generating a radar image of a selected area based on sequential radar images, which ensures continuous coverage of the area under study.

Keywords: Dual-frequency precipitation radar, inland waters, ice formation and destruction, algorithm of data processing

Введение

Для описания происходящих климатических изменений в качестве информативного параметра часто используют площадь морского льда в Арктике и Антарктике. На орбите функционирует «радиолокационная» группировка, позволяющая решать широкий круг задач и в том числе, измерять площадь морского льда. Наиболее известными радиолокаторами являются скаттерометр, радиовысотомер (альтиметр) и радиолокатор с синтезированной апертурой антенны (РСА).

Скаттерометры обеспечивают глобальное покрытие и благодаря широкой полосе обзора (> 1000 км) позволяют оперативно получать информацию о площади морского льда [1 - 4]. Недостаток скаттерометров состоит в низком пространственном разрешении (стандартное – 25×25 км), что делает невозможным наблюдение небольших внутренних водоемов.

Вторым инструментом глобального мониторинга морского льда является радиометр [5 - 8]. Широкая полоса обзора радиометра обеспечивает оперативный сбор данных, однако его низкое пространственное разрешение также не позволяет эффективно использовать эти данные для изучения небольших внутренних водоемов. Как и скаттерометр, радиометр определяет наличие морского льда и его сплоченность с ошибками [9].

Одним из самых перспективных инструментов для мониторинга ледяного покрова считается РСА, который способен обеспечить пространственное разрешение в несколько метров [10 - 13]. Для повышения информативности, также применяется объединение данных разных сенсоров с данными РСА [14, 15]. Мультисенсорный подход активно развивается для решения самых разных задач.

В последнее время развиваются технологии мониторинга на основе сигналов глобальных навигационных систем [16 - 18]. Недостатком этого подхода также является низкое пространственное разрешение (около 30 км) и данные представляют собой набор зеркальных точек, положение которых определяется схемой расположения спутников в момент выполнения измерений, что не позволяет гарантировать измерения в интересующей области.

На рис. 1 показана временная зависимость отклонения площади морского льда в текущем году от среднего значения [19]. Уменьшение площади морского льда в Арктике происходит с 1980 года, но это в определенной степени компенсировалось увеличением в Антарктике. Однако после 2015 года общая площадь морского льда (Арктика + Антарктика) стала уменьшаться.

Изменение климата влияет не только на морской лед, но и ледяной покров внутренних водоемов. Однако небольшие размеры внутренних водоемов затрудняют применение скаттерометров, радиовысотомеров и радиометров для мониторинга, а измерение в оптическом и ИК-диапазонах затруднено наличием облачности в период формирования и разрушения ледяного покрова. В ходе ранее проведенных исследований для решения этой задачи использовать данные двухчастотного дождевого радиолокатора (Dual-frequency Precipitation Radar - DPR), который установлен на спутнике GPM (Global Precipitation Mission) [20]. Было показано, что анализируя радиолокационные изображения DPR можно определить наличие или отсутствие льда на внутренних водоемах. [21 - 23]. В качестве критерия для оценки изменения климата можно использовать длительность (период) «существования» ледяного покрова на внутренних водоемах.



Рис. 1. Изменение площади морского льда в Арктическом и Антарктическом регионах [19].

Двухчастотный дождевой радиолокатор (DPR)

Двухчастотный дождевой радиолокатор (DPR - длина волны 2,1 см и 0,8 см) был выведен на орбиту 28 февраля 2014 в рамках первой Глобальной миссии по измерению осадков (GPM). Схема измерения приведена на рис. 2.

Высота орбиты GPM составляет около 400 км. Измерения выполняются в режиме сканирования при малых углах зондирования ($\pm 17^\circ$) и в результате формируется радиолокационное изображение шириной 245 км с разрешением около 5 км в Ku- и Ka-диапазонах.

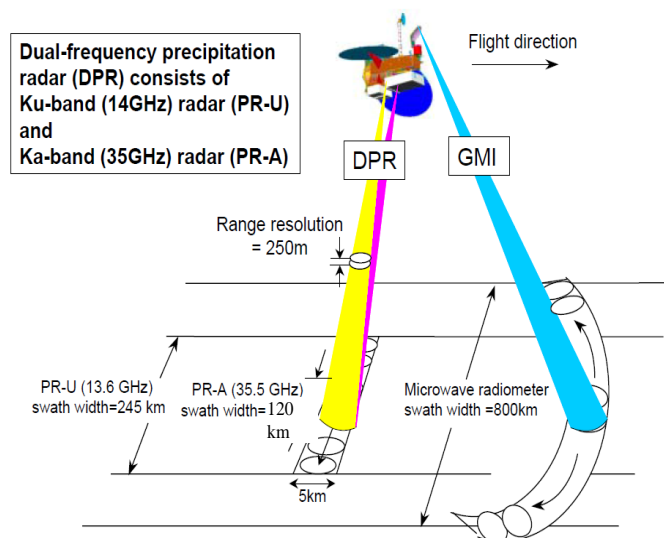


Рис. 2. Схема зондирования DPR.

При движении спутника формируется «сплошное» радиолокационное изображение подстилающей поверхности, т.к. размер «пятна» на поверхности, определяемый диаграммой направленности антенны, составляет около 5 км, а смещение радиолокатора за время скана – около 4 км. Параметры DPR приведены в [20]. Задача интересна тем,

что рассматриваются небольшие внутренние водоемы и для ее решения используются радиолокационные измерения при малых углах падения.

Тестовый полигон

В качестве тестового полигона для исследования была выбрана область, содержащая участок реки Волга между городами Саратов и Волгоград, и использовались данные с 01.11.2021 по 01.06.2022. На рис. 3 показана карта Яндекс, на которой изображена река Волга на участке от г.Саратов до г. Волгоград (слева), и оптическое изображение Modis (справа). Кроме р. Волга на карте присутствуют более мелкие реки и озера, которые также могут «проявиться» на радиолокационном изображении.



Рис. 3. Река Волга на участке от г. Саратов до г. Волгоград на карте Яндекс (слева) и на изображении Modis (справа)

Для определения состояния реки (лед/вода) можно использовать оптические данные, что было показано в работе [24]. Существенным ограничением является облачность. РСА обладает высоким пространственным разрешением, сравнимым с оптическим, но есть ограничения по частоте повторения наблюдений (наличию данных).

На рис. 4 приведены оптическое и радиолокационное изображения тестового полигона 16.12.2021. На оптическом снимке Modis (слева) видно, что река не покрыта льдом. На радиолокационном изображении (справа) «выделяется» река и черная прямая соответствует углу падения 4° .

В разработанном алгоритме для классификации типа отражающей поверхности (лед/вода) применяется «пороговый» метод. Для нахождения значения порогов для каждого угла падения использовалась информация о состоянии водоема по данным Terra/Modis. Пример разреза радиолокационного изображения в Ku- и Ka-диапазонах для угла падения -8° показан на рис. 5: слева – для водной поверхности, справа – для реки, покрытой льдом. Под «порогом» в работе понимается превышение максимума над средним уровнем.

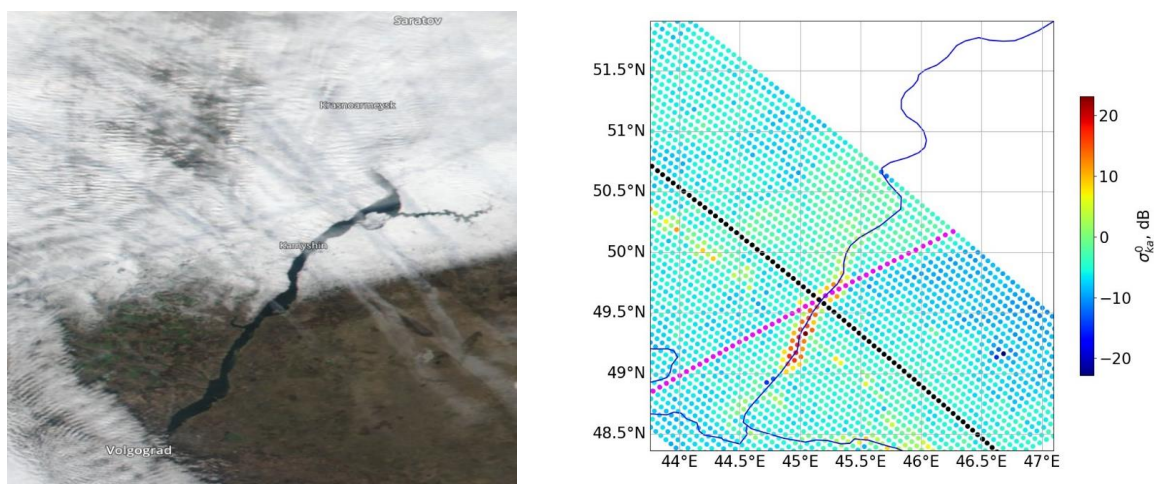


Рис. 4. Оптическое изображение Modis (слева) и радиолокационное изображение (справа) тестового полигона 16.12.2021

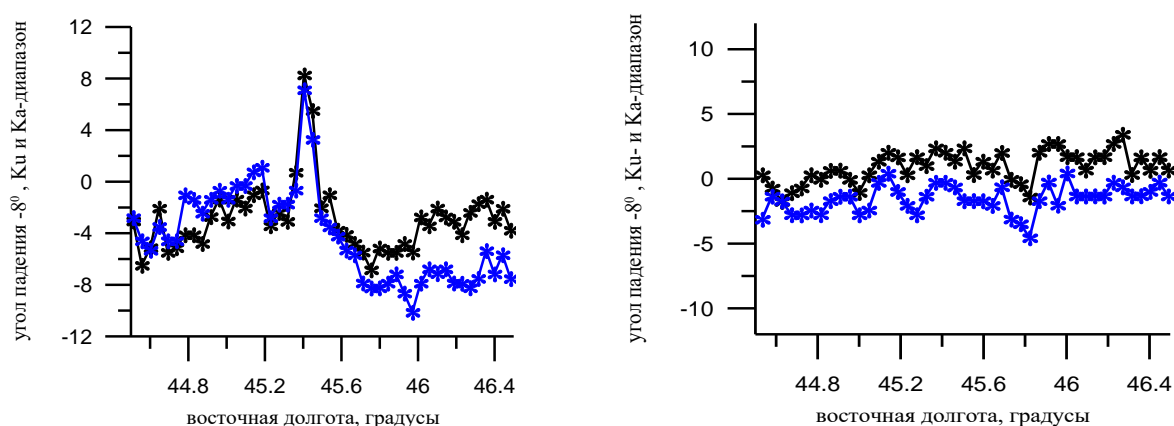


Рис. 5. Разрез радиолокационного изображения для углов падения -8° . Черным цветом показан Ку-диапазон, синим – Ка-диапазон. По вертикальной оси отложено сечение обратного рассеяния, дБ

Анализ данных

Следующий шаг в развитии алгоритма состоит в переходе от «ручной» обработки к автоматизации процесса определения состояния реки (лед/вода). Был проведен анализ и для каждого угла падения определены «пороги». Критерием выступает контраст между максимальным значением σ_{0max} и средним значением σ_{0aver} в разрезе для выбранного угла падения θ :

$$K_{ice}(\theta) = \frac{\sigma_{0max}(\theta)}{\sigma_{0aver}(\theta)},$$

где среднее значение вычисляется по разрезу радиолокационного изображения для угла падения θ (используется 7 отсчетов за вычетом максимального значения) для $n = 6$ точек. «Маска» реки (координаты) известны, поэтому центр отрезка (4 точка) находится на реке и рассматриваются ± 3 точки относительно реки.

Пример радиолокационных изображений в Ку- и Ка-диапазонах (сверху и снизу соответственно) приведен на рис. 6. Измерения были выполнены 17 декабря 2021 года, когда река не замерзла, и это хорошо видно на радиолокационном изображении (слева) и результаты обработки показаны справа.

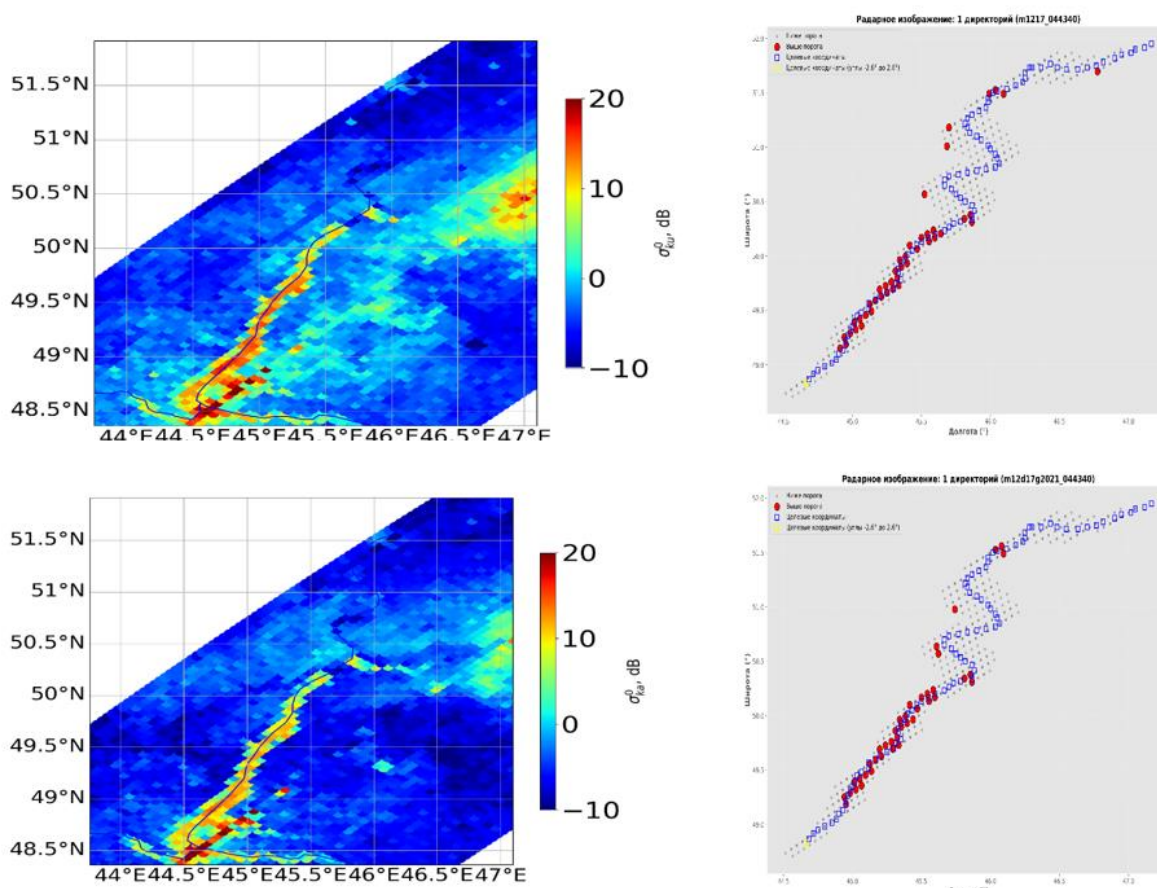


Рис. 6. Радиолокационные изображения 17 декабря 2021 г. в Ku- (сверху) и в Ka-диапазоне (снизу) - слева и обработка данных (справа)

Измерения выполняются под 49 углами падения с пространственным разрешением 5 км в направлении перпендикулярном направлению движения, следовательно, информацию о наличии/отсутствии ледяного покрова на реке можно получать с шагом в 5 км. Красными точками на русле реки показана «открытая» вода. Несколько красных точек находятся за пределами «русла» и могут являться следствием неточности алгоритма или говорят о наличии других водных объектов.

В марте река еще остается покрытой льдом, что видно на радиолокационных изображениях (рис. 7, слева) и на результатах обработки (рис. 7, справа). Желтыми точками показан участок вблизи надира, где обработка не выполняется. Отсутствие красных точек говорит, что река покрыта льдом.

Как уже отмечалось, для анализа протяжённых водных объектов недостаточно одного радиолокационного изображения, т.к. ширина полосы обзора составляет 245 км. Предлагается использовать последовательные измерения (радиолокационные изображения) и формировать общее изображение.

При наложении (объединении) нового радиолокационного изображения на старое используется следующий подход: более «старые» данные заменяются «новыми». На рис. 8 приведен пример наложения двух последовательных пролета.

В результате исследуемая область вне зависимости от размера наблюдается полностью. Между последовательными наблюдениями состояние поверхности (лед/вода) может меняться, однако для достаточно медленных процессов, например, формирование или разрушение ледяного покрова использование последовательных изображений не приведет к большим ошибкам.

На рис. 8 (справа) приведен пример обработки радиолокационного изображения, сформированного путем наложения двух последовательных радиолокационных изображений (рис. 8 слева).

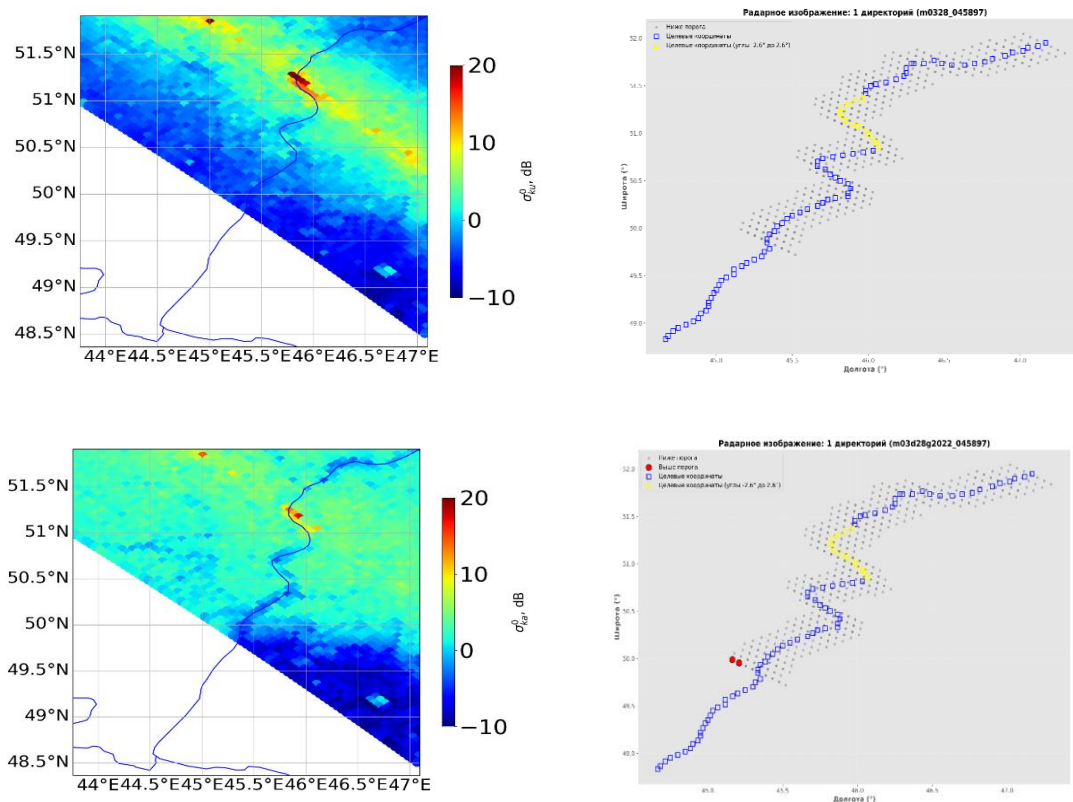


Рис. 7. Радиолокационное изображение в Ку- и Ка-диапазонах (слева) и обработка данных (справа)

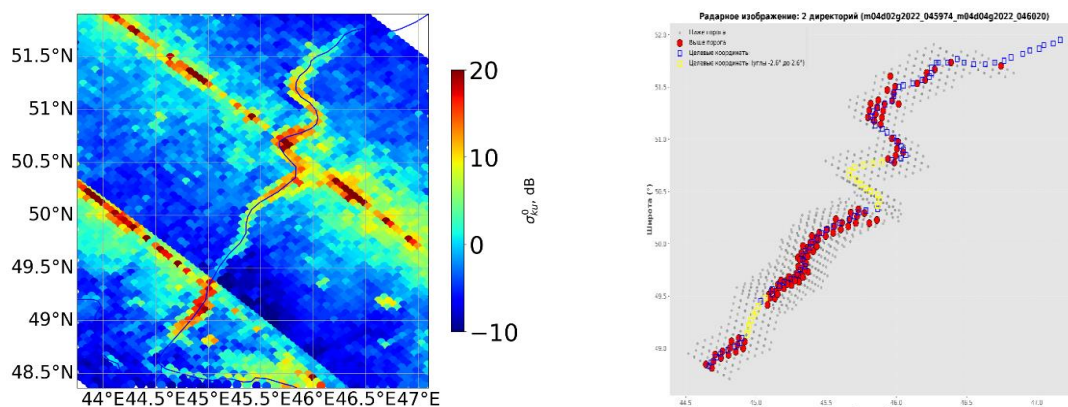


Рис. 8. На итоговых изображениях для каждого «пиксела» остаются более поздние по времени данные.

Таким образом, используя предложенный подход можно анализировать состояние поверхности внутренних водоемов, превосходящих по размеру ширину полосы обзора дождевого радиолокатора.

Выводы

Разработан алгоритм для автоматического определения наличия/отсутствия ледяного покрова на внутренних водоемах. В процессе обработки анализируются разрезы радиолокационного изображения по углу падения вдоль траектории полета и вычисляется радиолокационный контраст (вода/суша). В ходе проведенного анализа были определены пороговые значения для каждого угла падения. Обработка данных для тестового полигона на р. Волга (между г. Саратов и г. Волгоград) подтвердила работоспособность алгоритма.

Для наблюдения протяженных объектов предложен способ накопления (объединения) информации от разных радиолокационных изображений и создание результирующего радиолокационного изображения и результатов обработки для исследуемого водоема.

Таким образом, анализируя радиолокационное изображение внутреннего водоема можно определять даты формирования и разрушения ледяного покрова используя данные двухчастотного дождевого радиолокатора.

Исследование выполнено в рамках Госзадания ИПФ РАН (номер темы госзадания: FFUF-2024-0033 и FFUF-2024-0026).

Литература

1. Nekrasov A., Khachaturian A., Labun J., et al. (2020) Towards the Sea Ice and Wind Measurement by a C-Band Scatterometer at Dual VV/HH Polarization: A Prospective Appraisal // Remote Sensing. 2020. Vol. 12, no. 20. P. 3382. DOI: 10.3390/rs12203382.
2. Remund Q., Long D. (2014) A Decade of QuikSCAT Scatterometer Sea Ice Extent Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 52, no. 7. P. 4281–4290. DOI: 10.1109/tgrs.2013.2281056.
3. Rivas M., Verspeek J., Verhoef A., et al. (2012) Bayesian Sea Ice Detection With the Advanced Scatterometer ASCAT // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 50, no. 7. P. 2649–2657. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2182356.
4. Zhai X., Wang Z., Zheng Z., et al. (2021) Sea Ice Monitoring with CFOSAT Scatterometer Measurements Using Random Forest Classifier // Remote Sensing. Vol. 13, no. 22. P. 4686. DOI: 10.3390/rs13224686.
5. Тихонов В., Репина И., Раев М. и др. (2014) Новый алгоритм восстановления сплоченности морского ледяного покрова по данным пассивного микроволнового зондирования // Исследование Земли из космоса. № 2. С. 35—43. DOI: 10.7868/S0205961414020110.
6. Bremen University. Sea Ice Portal. <https://www.seaice.uni-bremen.de/start/>.
7. Wu S., Shi L., Zou B., et al. (2023) Daily Sea Ice Concentration Product over Polar Regions Based on Brightness Temperature Data from the HY-2B SMR Sensor // Remote Sensing. Vol. 15, no. 6. P. 1692. DOI: 10.3390/rs15061692.
8. Zabolotskikh E. V. (2019) Review of Methods to Retrieve Sea-Ice Parameters from Satellite Microwave Radiometer Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. Vol. 55, no. 1. P. 110–128. DOI: 10.1134/s0001433818060166.
9. Животовская М., Заболотских Е., Шапрон Б. (2019) Ложная диагностика морского льда в Арктике спутниковыми микроволновыми радиометрами в экстремальных погодных условиях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 16, № 6. С. 209—220. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-209-220.
10. Заболотских Е. В., Хворостовский К. С., Животовская М. А. и др. (2023) Спутниковое микроволновое зондирование морского льда Арктики. Обзор // Современные проблемы

- дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 20, № 1. С. 9—34. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-9-34.
11. Kim J.-W., Kim D.-J., Hwang B. J. (2012) Characterization of Arctic Sea Ice Thickness Using High-Resolution Spaceborne Polarimetric SAR Data // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 50, no. 1. P. 13–22. — DOI: 10.1109/tgrs.2011.2160070
 12. Leigh S., Wing Z., Clausi D. (2014) Automated Ice-Water Classification Using Dual Polarization SAR Satellite Imagery // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 52, no. 9. P. 5529–5539. DOI: 10.1109/tgrs.2013.2290231
 13. Zakhatkina N. Yu., Alexandrov V. Yu., Johannessen O. N., et al. (2013) Classification of Sea Ice Types in ENVISAT Synthetic Aperture Radar Images // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 51, no. 5. P. 2587–2600. DOI: 10.1109/tgrs.2012.2212445.
 14. Cooke C. L. V., Scott K. A. (2019) Estimating Sea Ice Concentration From SAR: Training Convolutional Neural Networks With Passive Microwave Data // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 57, no. 7. P. 4735–4747. DOI: 10.1109/TGRS.2019.2892723.
 15. Karvonen J. (2017) Baltic Sea Ice Concentration Estimation Using SENTINEL-1 SAR and AMSR2 Microwave Radiometer Data // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 55, no. 5. P. 2871–2883. DOI: 10.1109/tgrs.2017.2655567.
 16. Ковалдов Д. А., Титченко Ю. А., Караев В. Ю. и др. (2024) К вопросу об определении диаграммы рассеяния ледяного покрова по данным бистатического дистанционного зондирования в L-диапазоне // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. Т. 21, № 6. С. 294—308. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-294-308.
 17. Yan Q., Huang W. (2016) Spaceborne GNSS-R Sea Ice Detection Using Delay-Doppler Maps: First Results From the U.K.TechDemoSat-1 Mission // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. Vol. 9, no. 10. P. 4795–4801. DOI: 10.1109/jstars.2016.2582690.
 18. Kovaldov D. A., Karaev V. Y., Titchenko Y. A., Fateev V., Lopatin V., Huang F., Wang X., Guo J. (2025) Reconstruction of the Angular Dependence of the Sea Ice Backscattering Pattern According to the GNSS-R Data // *Russian Journal of Earth Sciences*. no. 5. DOI: <https://doi.org/10.2205/2025ES001082>
 19. Bureau of Meteorology. State of the Climate 2024. Cryosphere (2024). <http://www.bom.gov.au/state-of-theclimate/cryosphere.shtml>
 20. JAXA (2014) GPM Data Utilization Handbook, 1st ed., JAXA: Tokyo, Japan, p. 92.
 21. В.Караев, Е.Сорокин, Ю.Титченко, М.Панфилова, Е.Мешков, Д.Ковалдов (2025) Обнаружение формирования и разрушения ледяного покрова на внутренних водоемах по данным двухчастотного дождевого радиолокатора // *Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Материалы Всероссийской открытой научной конференции*. Муром: МИ ВлГУ, 314 с. (стр. 172-179, DOI: 10.24412/2304-0297-2025-1-172-179)
 22. Karaev, V. Yu., E. S. Sorokin, M. A. Panfilova, Yu. A. Titchenko, E. M. Meshkov, D. A. Kovaldov (2025), On the Problem of Radar Monitoring of Ice Cover Formation and Destruction on Inland Waters: First Assessments // *Russian Journal of Earth Sciences*, ES3009. <https://doi.org/10.2205/2025ES001020>, EDN: NZVMMR
 23. Panfilova M., Karaev V. (2026) Sea ice detection on Lake Ladoga using data from the DPR radar onboard the GPM satellite // *IGARSS 2026*, submitted
 24. Ромасько В.Ю., Гордеева О.С., Новикова О.Г., Рублев И.В. (2024) Спутниковый мониторинг положения кромки льда на крупных реках Сибири // *Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*. Москва: ИКИ РАН, С. 123. DOI 10.21046/22DZZconf-2024a