

Детектирование ледяного покрова на Ладожском озере по данным радиолокатора DPR на борту спутника GPM

Мария Панфилова, Владимир Караев
*Институт Прикладной Физики РАН
Нижний Новгород*

Введение

Мониторинг динамики ледового покрова озёр имеет важное значение для климатических исследований, рыбного хозяйства, судоходства, обеспечения безопасности населения и лимнологических исследований. Оптические спутниковые наблюдения позволяют получать детальную информацию о состоянии ледового покрова, однако в зимний период их применение существенно ограничено облачностью и сокращением продолжительности светового дня. Эти ограничения в значительной степени преодолеваются с помощью активных микроволновых сенсоров, в частности радаров с синтезированной апертурой (SAR), которые продемонстрировали высокую эффективность при мониторинге ледового покрова озёр. Вместе с тем данные SAR не всегда доступны с необходимой временной периодичностью.

Двухчастотный радар осадков (DPR), установленный на борту спутника Global Precipitation Measurement (GPM), обеспечивает регулярные наблюдения с пространственным разрешением порядка 5 км, что позволяет осуществлять мониторинг крупных внутренних водоёмов. В предыдущих исследованиях была продемонстрирована чувствительность нормированной эффективной площади рассеяния (NRCS) радара DPR к наличию ледового покрова на озере Байкал и реке Волге [1, 2]. Кроме того, были успешно разработаны автоматизированные алгоритмы обнаружения морского льда на основе данных DPR для полярных регионов [3, 4].

В настоящем исследовании рассматривается возможность применения данных DPR для мониторинга ледового покрова озёр и предлагается простой алгоритм обнаружения льда для Ладожского озера.

Ледовый режим Ладожского озера

Согласно исследованию [5], ледовый режим Ладожского озера характеризуется следующими особенностями. Ледовые явления на поверхности озера могут наблюдаться более шести месяцев — обычно с начала ноября до конца мая. Согласно многолетним средним наблюдениям, первые компактные ледовые образования, выявляемые по данным дистанционного зондирования, появляются в Петрокрепостной губе в конце декабря. К концу января все южные заливы, как правило, полностью покрываются неподвижным льдом. Основная часть акватории озера полностью покрывается льдом в период с середины февраля до середины марта, однако глубоководная северо-западная часть озера нередко остаётся свободной ото льда.

Вскрытие озера происходит, как правило, быстрее и динамичнее, чем его замерзание. Первые трещины, формирование которых обусловлено воздействием ветра, обычно появляются в конце марта к югу от Валаамского архипелага и в районе южных заливов. Дольше всего ледовые образования, выявляемые по данным дистанционного зондирования, сохраняются вдоль восточного побережья. К концу мая озеро, как правило, полностью освобождается ото льда.

Данные радиолокатора

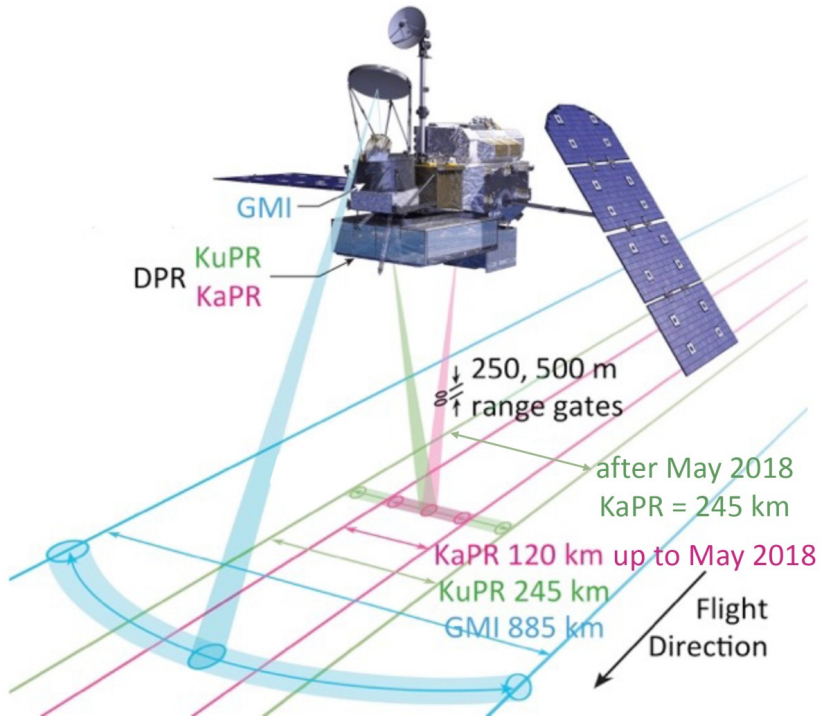


Схема сканирования радиолокатора DPR

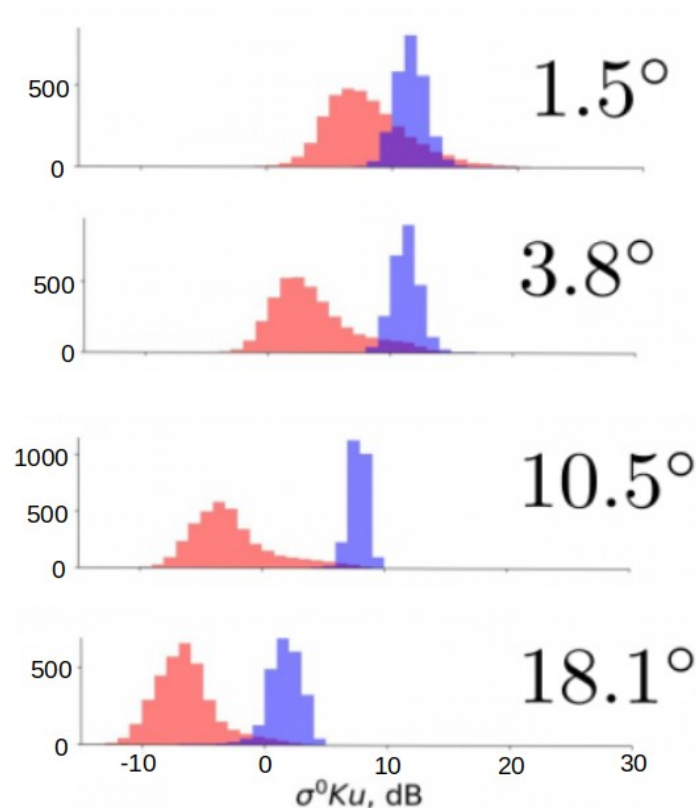
В исследовании использовались данные Ku-диапазонного двухчастотного радара осадков (DPR), установленного на борту спутника Global Precipitation Measurement (GPM), за зимний период 2018 года. Радиолокационные измерения содержат данные о нормированной эффективной площади рассеяния (NRCS) для углов падения от 0 до 18°, при этом пространственное разрешение радара составляет 5 км. Схема сканирования представлена на рисунке 1.

Источник данных:

GPM satellite data archive:

URL: <https://storm.pps.eosdis.nasa.gov/storm/> (accessed 10/12/2025)

Гистограммы значений УЭПР



Для каждого угла падения были построены гистограммы нормированного радиолокационного сечения (NRCS) для ледяной и водной поверхностей. На рисунке приведены примеры гистограмм NRCS для льда и открытой воды при нескольких углах падения.

Красным цветом показаны значения NRCS для ледяной поверхности, а синим — значения NRCS для открытой воды. Классы льда и воды хорошо разделяются, что позволяет применять простой метод пороговой классификации для их различения.

При $\theta \leq 2^\circ$ гистограммы значительно перекрываются, поэтому классификация типа поверхности в данном диапазоне углов падения невозможна.

Метод определения типа поверхности

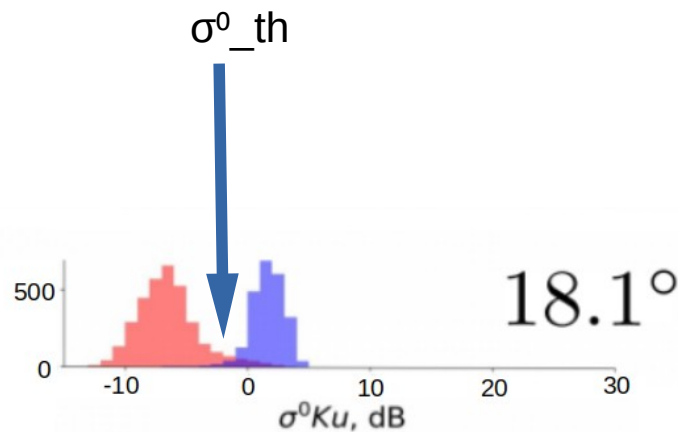
Для определения порогового значения был применён метод Оцу.

Для упрощения зависимость порогового значения NRCS (σ^0_{th}) от угла падения θ была параметризована следующим образом:
 $\sigma^0_{th} = -0,64 \theta + 11,43$.

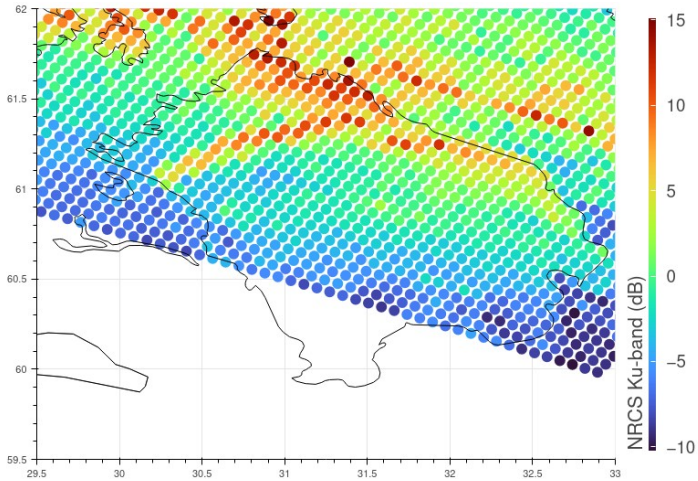
При $\theta > 2^\circ$ для классификации поверхностей применяются следующие критерии:

если $\sigma^0 \geq \sigma^0_{th} \rightarrow$ поверхность открытой воды;

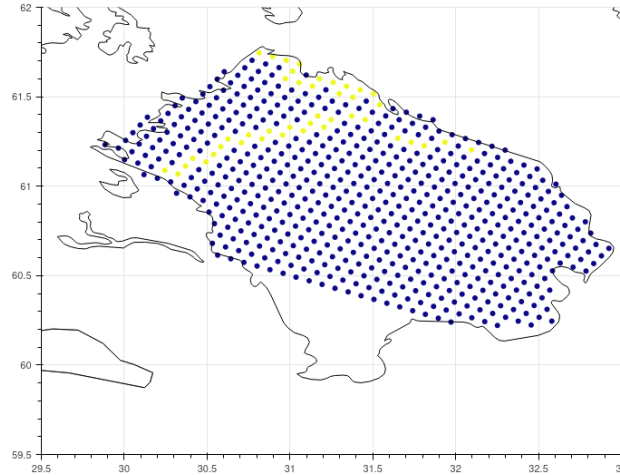
если $\sigma^0 < \sigma^0_{th} \rightarrow$ ледяной покров.



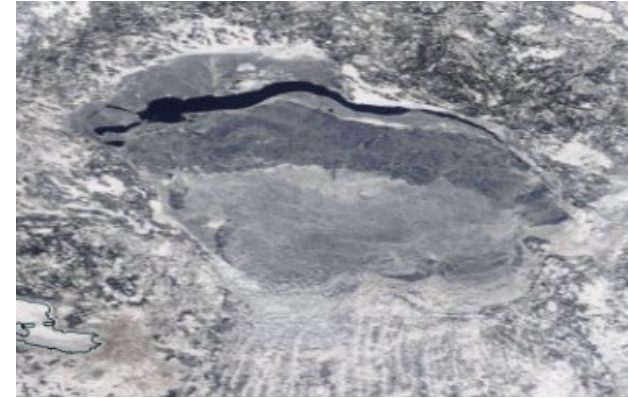
Пример применения алгоритма



Исходные данные DPR



Результат применения маски:
синие точки – лед, желтые – вода



Изображение MODIS

Заключение

В данной работе разработан простой пороговый алгоритм обнаружения ледового покрова на внутренних водоёмах с использованием данных Ku-диапазона двухчастотного радара осадков (DPR), установленного на борту спутника GPM. На основе статистического анализа гистограмм нормированной эффективной площади рассеяния (NRCS) для льда и открытой воды определён порог, зависящий от угла падения, который был применён к данным DPR над акваторией Ладожского озера.

Полученные маски ледового покрова и открытой воды хорошо согласуются с эталонными оптическими изображениями MODIS и позволяют успешно выявлять сплошной ледовый покров, а также участки открытой воды, такие как трещины внутри ледового поля. Результаты показывают, что, несмотря на относительно низкое пространственное разрешение, данные DPR могут эффективно использоваться для мониторинга ледовой обстановки на крупных озёрах.

Предложенный подход отличается вычислительной простотой и хорошо подходит для регулярного долговременного мониторинга. Дальнейшее совершенствование алгоритма может включать использование дополнительной информации о температуре поверхности и характеристиках снежного покрова.

Список литературы

1. V. Karaev, M. Panfilova, Y. Titchenko, E. Meshkov, G. Balandina, and Z. Andreeva, "Monitoring of inland waters by dual-frequency precipitation radar: First results," IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 11, no. 11, pp. 4364–4372, 2018.
2. V. Y. Karaev, E. S. Sorokin, M. A. Panfilova, Y. A. Titchenko, E. M. Meshkov, and D. A. Kovaldov, "On the problem of radar monitoring of ice cover formation and destruction on inland waters: First assessments," Russian Journal of Earth Sciences, vol. 25, no. 3, p. ES3009, 2025
3. M. Panfilova and V. Karaev, "Sea ice detection by an unsupervised method using ku- and ka-band radar data at low incidence angles: First results," Remote Sensing, vol. 15, no. 14, 2023. <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/14/3530>
4. M. Panfilova and V. Karaev, "Sea ice detection method using the dependence of the radar cross-section on the incidence angle," Remote Sensing, vol. 16, no. 5, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/5/859>
5. В. А. Румянцев, С. А. Кондратьев, ред. Ладожское озеро. Санкт-Петербург, Россия: Институт озероведения РАН, 2013. Издано при поддержке гранта Русского географического общества.



Код для загрузки и визуализации данных доступен по адресу:

https://github.com/dmburd/Earthdata_download_visualize

Авторы выражают благодарность Дмитрию Игоревичу Бурдейному.
Работа была выполнена в рамках госзадания ИПФ РАН (FFUF-2025-0005).