

Обнаружение формирования и разрушения ледяного покрова на внутренних водоемах по данным двухчастотного дождевого радиолокатора

В.Ю. Караев, Е.С. Сорокин, Ю.А. Титченко, М.А. Панфилова, 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

Одним из ключевых параметров для оценки происходящих изменений климата является площадь морского льда в Арктике и Антарктике. Климатические изменения затрагивают сушу и эта информация тоже важна для ученых. В качестве критерия для суши можно выбрать длительность существования ледяного покрова на внутренних водоемах. Для выполнения оперативного мониторинга на аэрокосмические носители могут быть установлены радиометры, радиолокаторы с реальной и синтезированной апертурой, оптические и инфракрасные датчики. В данной работе обсуждаются возможности применения данных двухчастотного дождевого радиолокатора, который выполняет измерения при малых углах зондирования ($< 17^\circ$) для определения дат формирования и разрушения ледяного покрова на внутренних водоемах. На примере тестового полигона на р. Волга показано, что переход от водной поверхности к ледяному покрову и наоборот, можно обнаружить при анализе последовательных радиолокационных изображений.
Ключевые слова: двухчастотный дождевой радиолокатор, внутренние водоемы, формирование и разрушение ледяного покрова

Detection of ice formation and destruction on inland water bodies using dual-frequency precipitation radar data

V. Yu. Karaev, E. S. Sorokin, Yu. A. Titchenko, M. A. Panfilova, 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"

One of the key parameters for assessing ongoing climate change is the area of sea ice in the Arctic and Antarctic. Climate change affects land and this information is also important for scientists. The duration of ice cover on inland waters can be chosen as a criterion for land. Radiometers, real and synthetic aperture radars, optical and infrared sensors can be installed on aerospace carriers to perform operational monitoring. This paper discusses the possibilities of using data from a dual-frequency precipitation radar, which takes measurements at small sounding angles ($< 17^\circ$), to determine the dates of ice cover formation and destruction on inland waters. Using the example of a test site on the Volga River, it is shown that the transition from the water surface to the ice cover and vice versa can be detected by analyzing successive radar images.
Keywords: Dual-frequency precipitation radar, inland waters, ice formation and destruction

Введение

В последние десятилетия проблема изменения климата Земли и оценка скорости происходящих изменений становится одной из важнейших задач, стоящих перед учеными. В качестве одного из критериев можно использовать длительность (период)

«существования» ледяного покрова на внутренних водоемах. В настоящее время на орбите сформирована большая «радиолокационная» группировка, позволяющая решать широкий круг задач. Наиболее известными радиолокаторами являются скаттерометр, радиовысотомер (альтиметр) и радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА).

Однако небольшие размеры внутренних водоемов затрудняют применение скаттерометров, радиовысотомеров и радиометров для мониторинга, а использование оптических средств крайне затруднено наличием облачности в период формирования и разрушения ледяного покрова. Для решения этой задачи предлагается использовать данные двухчастотного дождевого радиолокатора (Dual-frequency Precipitation Radar - DPR), который установлен на спутнике GPM (Global Precipitation Mission) [1]. 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. После формирования ледяного покрова река становится «незаметной» на радиолокационном изображении, что позволяет определить дату формирования ледяного покрова. «Появление» реки на радиолокационном изображении весной говорит о разрушении ледяного покрова [2]. В ходе исследования на примере «тестового» полигона выполнена проверка этого предположения.

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. 1.

Высота орбиты GPM составляет около 400 км. Радиолокатор сканирует в направлении перпендикулярном направлению полета и ширина полосы обзора составляет около 245 км с разрешением 5 км.

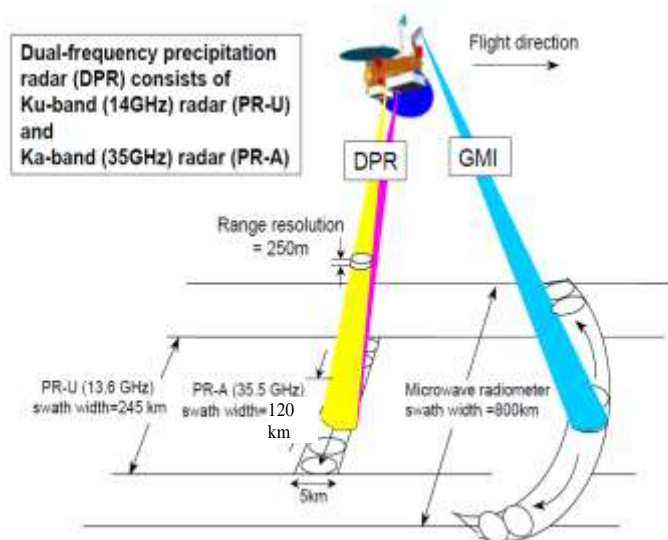


Рис. 1. Схема зондирования DPR.

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 [1].

Наклонение орбиты составляет 60° , поэтому DPR выполняет измерения над территорией с долговременным снежным покровом и ледяным покровом внутренних

водоемов. В средней полосе осенью происходит формирование ледяного покрова на внутренних водоемах, а весной происходит разрушение ледяного покрова. Задача интересна тем, что рассматриваются небольшие внутренние водоемы и впервые для ее решения будут использоваться радиолокационные измерения при малых углах падения.

Для примера на рис. 2 приведено радиолокационное изображение Охотского моря. Спутник движется снизу вверх и на радиолокационном изображении внизу справа присутствует морское волнение (широкая зеленая полоса) и далее по траектории движения появляется морской лед и сечение обратного рассеяния уменьшается (узкая зеленая полоса и широкая синяя полоса).

Море является удобным объектом для мониторинга из-за своих больших размеров. Были разработаны алгоритмы для классификации подстилающей поверхности по критерию «лед-вода» по данным [3, 4].

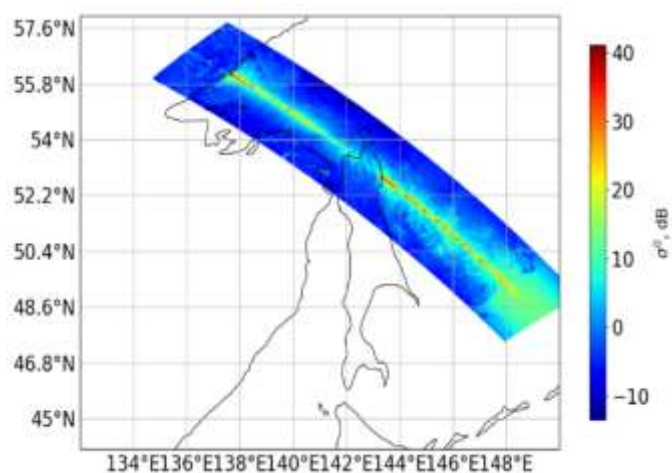


Рис. 2. Пример радиолокационного изображения Охотского моря

Большие внутренние водоемы также являются хорошим объектом для DPR, например, Ладожское озеро. Летом озеро «выделяется» на радиолокационном изображении (Рис. 3, верхний рисунок, 5.07.2015). Сечение обратного рассеяния суши при малых углах падения меньше, чем поверхностного волнения. Нижнее изображение (рис. 3) было получено зимой (06.02.2015). Озеро хорошо видно на радиолокационном «зимнем» изображении, что противоречит ожиданиям, т.к. сечение обратного рассеяния льда сравнимо с сечением обратного рассеяния суши. Однако оказалось, что этой зимой озеро не замерзло, что видно на оптическом изображении Modis. На оптическом изображении небольшой участок льда был только около правого берега. Поэтому летнее и зимнее радиолокационные изображения похожи.

Тестовый полигон

Для первого исследования было решено использовать относительно «большой» внутренний водоем. В нижнем течении р. Волга становится достаточно широкой и будет хорошо заметна на радиолокационном изображении. Задача определения минимальной площади внутреннего водоема, который становится заметным на радиолокационном изображении, будет рассматриваться в дальнейших исследованиях.

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. 4 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 могут «проявиться» на радиолокационном изображении.

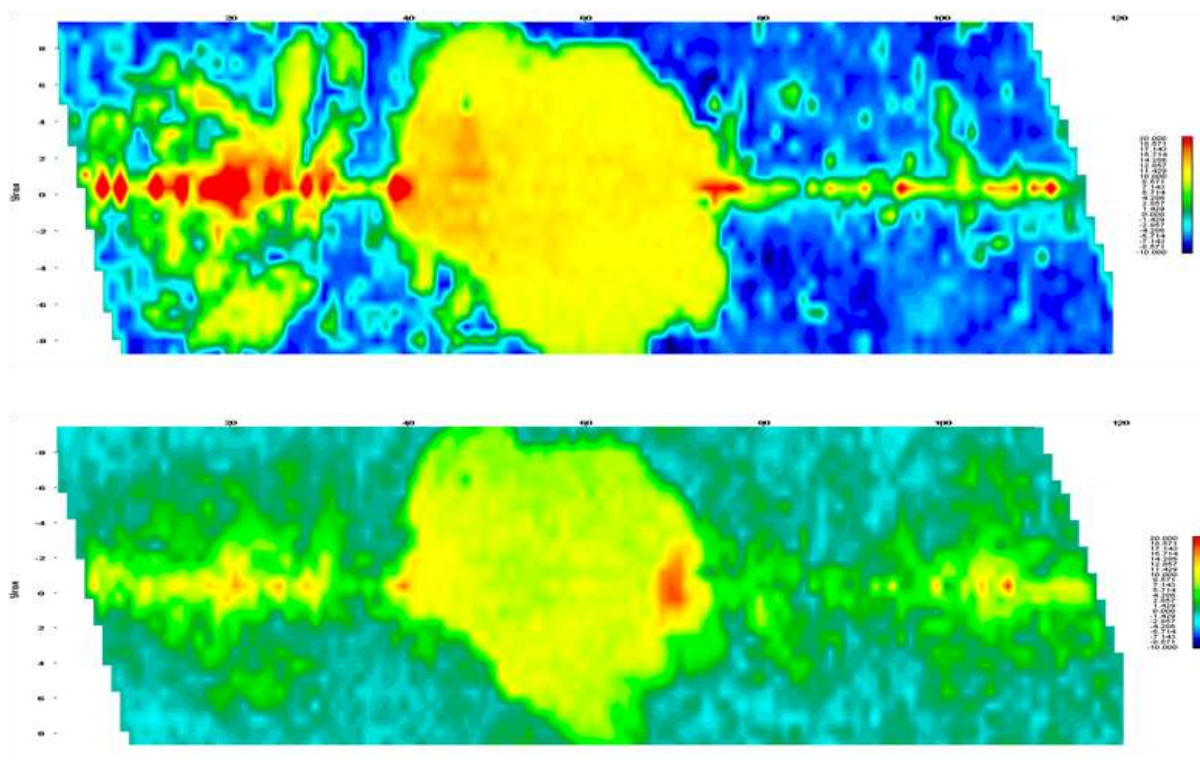


Рис. 3. Радиолокационное изображение Ладожского озера летом 5.07.2015 - верхний рисунок и зимой 06.02.2015 - нижний рисунок.

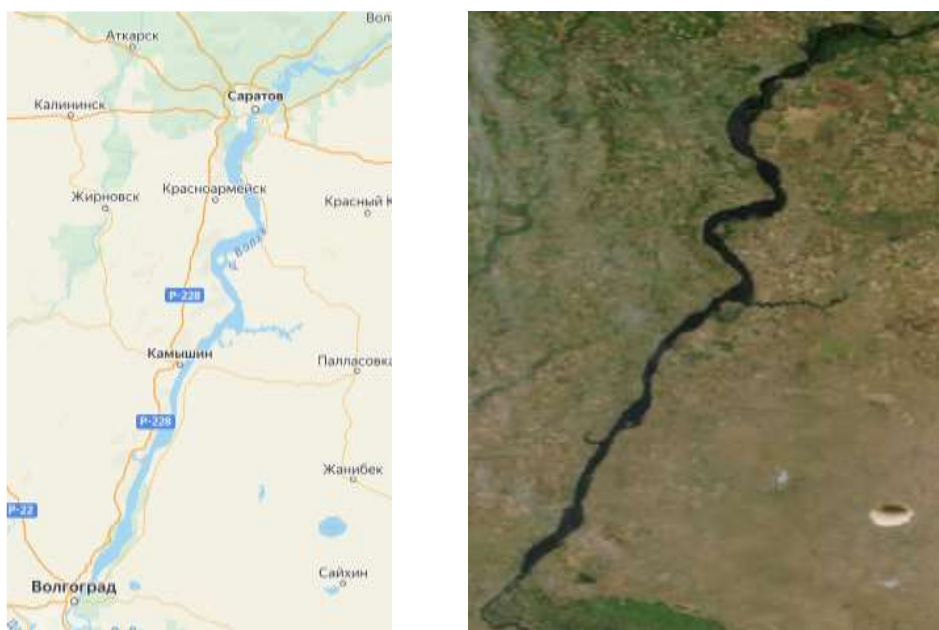


Рис. 4. Река Волга на участке от г. Саратов до г. Волгоград на карте Яндекс (слева) и на изображении Modis (справа)

На рис.5 приведено радиолокационное изображение DPR (Ка-диапазон) и синей кривой показано положение р. Волга. Ширина реки не отражена на рисунке.

Цвет «точек» соответствует измеренному сечению обратного рассеяния в дБ. Черная кривая проведена через центр радиолокационного изображения и красная кривая – вдоль направления сканирования.

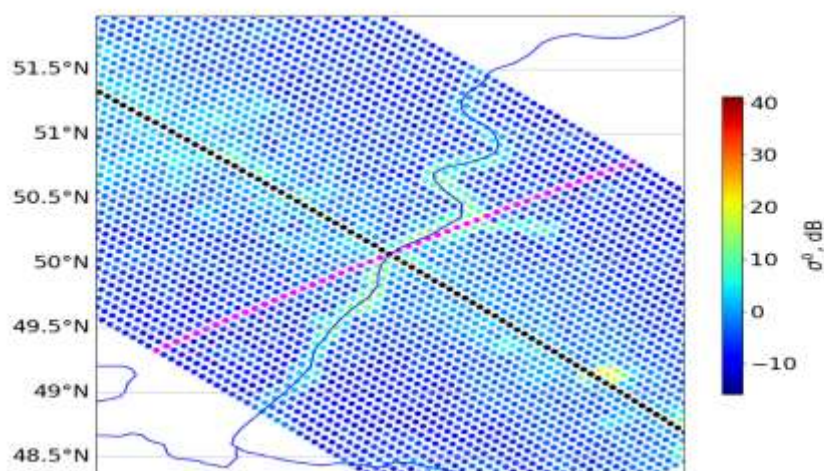


Рис. 5. Радиолокационное изображение исследуемой области 12.08.2022 (Ка-диапазон)

Для определения состояния реки (лед/вода) можно использовать оптические данные, что было показано в работе [5]. Существенным ограничением является облачность. РСА обладает высоким пространственным разрешением, сравнимым с оптическим, но есть ограничения по частоте повторения наблюдений (наличию данных).

Анализ данных

На рис. 6 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°.

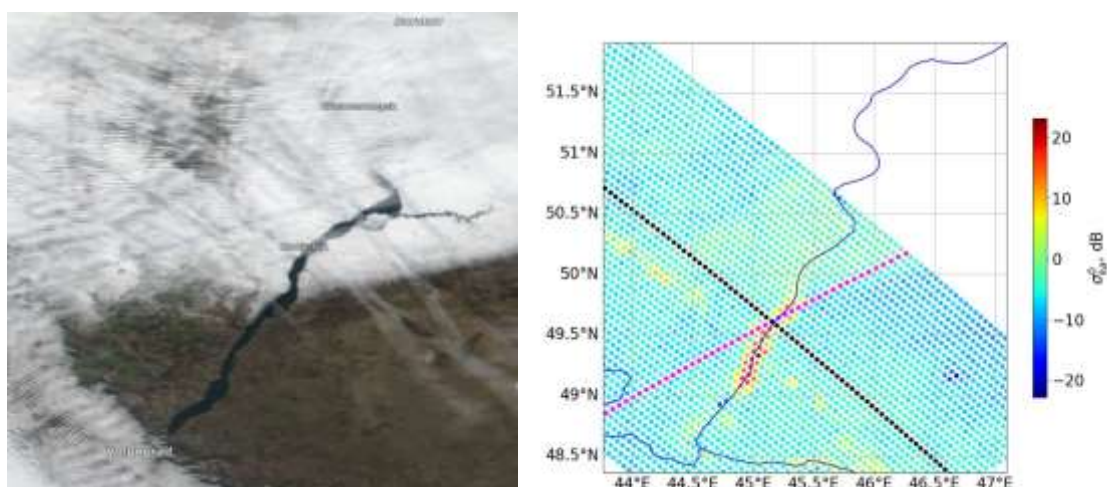


Рис. 6. Оптическое изображение Modis (слева) и радиолокационное изображение (справа) тестового полигона 16.12.2021

На рис. 7 показана зависимость сечения обратного рассеяния от долготы вдоль черной кривой (угол падения 4°). При малых углах падения сечение обратного рассеяния суши существенно меньше, чем сечение обратного рассеяния водной поверхности. Это приводит к появлению «пика» при пересечении реки.

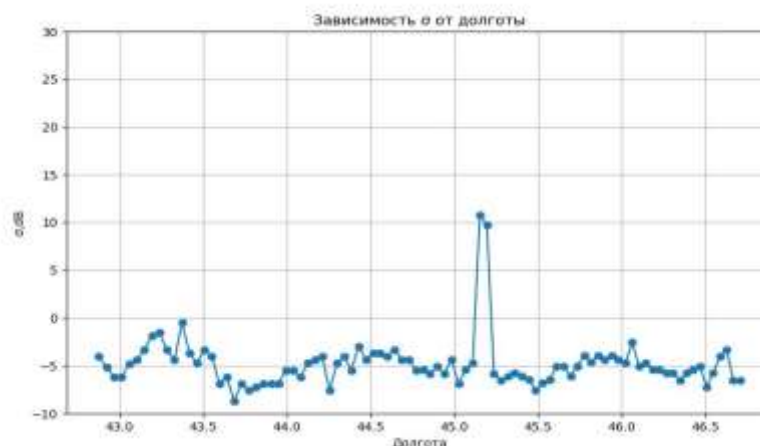


Рис. 7. Разрез радиолокационного изображения (16.12.2024) для угла падения 4°

На рис. 8 приведены радиолокационное изображение (слева) и разрез для угла падения 4° (справа) 27.12.2021. Река становится «незаметной» на изображении и это подтверждается на разрезе. Пик, характерный для отражения от водной поверхности, пропал. Сечение обратного рассеяния льда и суши, покрытой снегом, близки, поэтому река не видна на радиолокационном изображении.

На протяжении всего «зимнего» периода река не выделяется на радиолокационном изображении. Сход снежного покрова также не повлиял на результат – река остается «незаметной». Только после разрушения ледяного покрова река «проявляется» на радиолокационном изображении 02.04.2022, что видно на рис. 9.

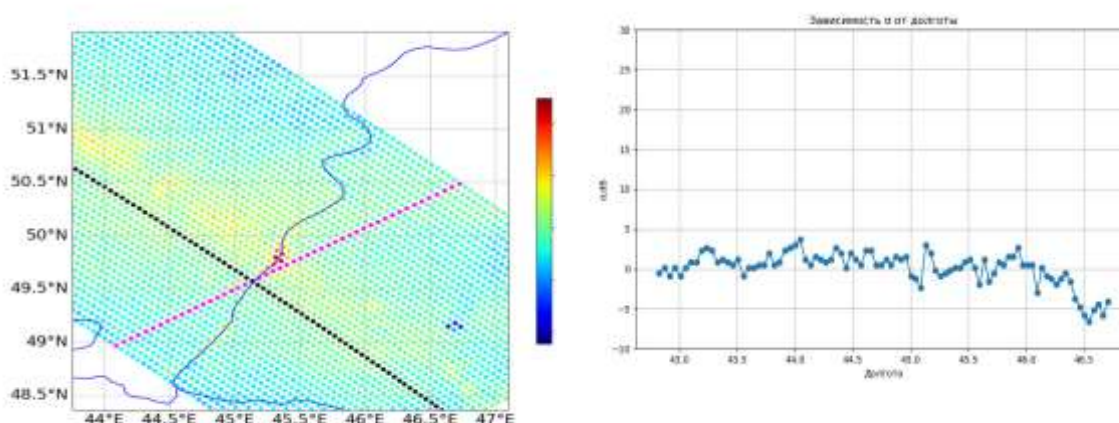


Рис. 8. Радиолокационное изображение 27.12.2021 (слева) и разрез радиолокационного изображения для угла падения 4°

На «разрезе» видно, что другие мелкие водоемы, которые расположены на выбранном полигоне, «наполняются» водой, увеличиваются в размерах и начинают проявляться на радиолокационном изображении. Исследование влияния весеннего половодья на радиолокационное изображение было выполнено в работах [6, 7].

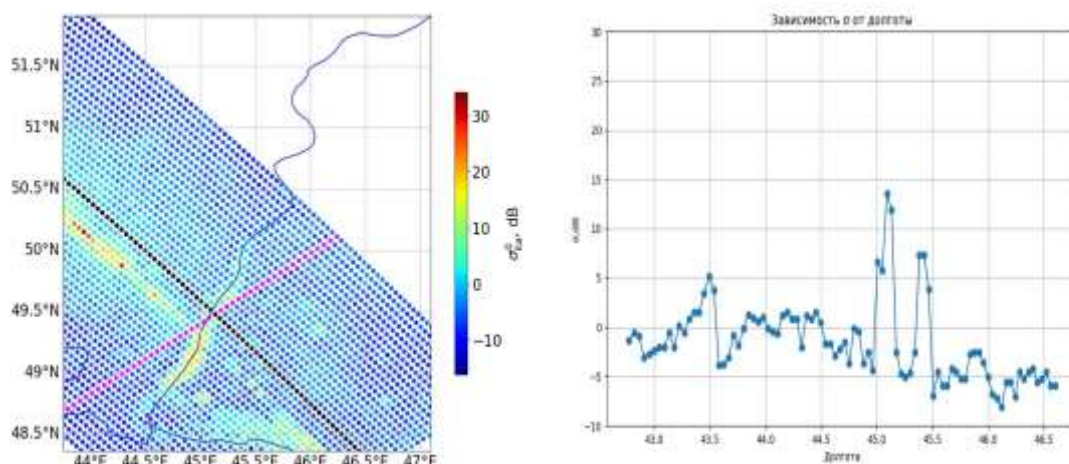


Рис. 9. Радиолокационное изображение 02.04.2022 (слева) и разрез для угла падения 4°

Таким образом, анализируя радиолокационное изображение внутреннего водоема можно определять даты формирования и разрушения ледяного покрова.

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.

Выводы

Проведено исследование возможности использования данных DPR для мониторинга внутренних водоемов. Было подтверждено предположение, что при малых углах падения в радиолокационном изображении поверхности можно обнаружить небольшие, по сравнению с пятном засветки (5 км), внутренние водоемы, не имеющие ледяного покрова.

При наличии ледяного покрова внутренний водоем становится «незаметным» на радиолокационном изображении и это позволяет обнаруживать момент перехода, т.е. определять дату формирования или разрушения ледяного покрова.

Проведена обработка данных для выбранного полигона на р. Волга (между г. Саратов и г. Волгоград) и показано, что использование данных DPR позволяет определять время формирования и разрушения ледяного покрова на внутренних водоемах.

Длительность существования ледяного покрова на внутренних водоемах является одним из индикаторов происходящих климатических изменений и по данным DPR можно определять этот параметр.

В ходе дальнейших исследований будут определены размеры внутренних водоемов, которые можно мониторить по данным DPR.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-77-10064, <https://rscf.ru/project/23-77-10064/>.

Литература

1. JAXA. GPMDDataUtilization Handbook, 1st ed., JAXA: Tokyo, Japan, 2014; p. 92.

2. Караев В.Ю., Сорокин Е.С., Титченко Ю.А., Панфилова М.А., Мешков Е.М. К вопросу об использовании данных двухчастотного дождевого радиолокатора для мониторинга ледяного покрова внутренних водоемов // Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2024. С. 390. DOI 10.21046/22DZZconf-2024a
3. Panfilova, M., Karaev, V. (2023), Sea Ice Detection by an Unsupervised Method Using Ku- and Ka-Band Radar Data at Low Incidence Angles: First Results // Remote Sensing, 15, 3530. <https://doi.org/10.3390/rs15143530>
4. Panfilova, M., Karaev, V. (2024), Sea Ice Detection Method Using the Dependence of the Radar Cross-Section on the Incidence Angle // Remote Sensing, 16, 859. <https://doi.org/10.3390/rs16050859>
5. Ромасько В.Ю., Гордеева О.С., Новикова О.Г., Рублев И.В. Спутниковый мониторинг положения кромки льда на крупных реках Сибири // Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2024. С. 123. DOI 10.21046/22DZZconf-2024a
6. Karaev, V., Panfilova, M., Titchenko, Yu., Meshkov, E., Balandina, G., Andreeva, Z. (2018) Monitoring of Inland waters by Dual-frequency Precipitation Radar: First results // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote sensing (J-STARS). Vol. 11. No. 4, Digital Object Identifier: 10.1109/JSTARS.2018.2874697
7. Караев В., Панфилова М., Мешков Е., Титченко Ю., Баландина Г., Андреева З., Развитие гидрологической обстановки на реках по радиолокационным данным двухчастотного дождевого радиолокатора: первые результаты // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2017, Т. 14, N 1, С. 185-199.