

К ВОПРОСУ О РАДИОЛОКАЦИОННОМ МОНИТОРИНГЕ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА НА ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМАХ: ПЕРВЫЕ ОЦЕНКИ

В. Ю. Караев^{*}, Е. С. Сорокин, М. А. Панфилова, Ю. А. Титченко, Е. М. Мешков, Д. А. Ковалдов

Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, г. Нижний Новгород, Россия

^{*} **Контакт:** Владимир Юрьевич Караев, volody@ipfran.ru

Для мониторинга происходящих климатических изменений активно применяются дистанционные методы и, в качестве одного из критериев, используется площадь морского льда в Арктике и Антарктике. Для оценки процессов внутри материков можно использовать длительность существования ледяного покрова на внутренних водоемах. Небольшие размеры водоемов не позволяют использовать традиционные методы, которые хорошо себя зарекомендовали в условиях моря. В данном исследовании рассматривается возможность применения данных двухчастотного дождевого радиолокатора для обнаружения формирования и разрушения ледяного покрова на небольших внутренних водоемах. Благодаря особенностям обратного рассеяния при малых углах падения ($< 18^\circ$), внутренние водоемы с размерами меньше элемента разрешения радиолокатора (5 км) «видны» на радиолокационных изображениях. На примере р. Волга показано, что переходы «вода-лед» и «лед-вода» могут быть обнаружены при анализе радиолокационных изображений и, таким образом, получены оценки длительности существования ледяного покрова на внутренних водоемах.

Ключевые слова: внутренний водоем, ледяной покров, двухчастотный дождевой радиолокатор, радиолокационное изображение, малые углы падения.

Цитирование: Караев, В. Ю., Е. С. Сорокин, М. А. Панфилова, Ю. А. Титченко, Е. М. Мешков, Д. А. Ковалдов К вопросу о радиолокационном мониторинге формирования и разрушения ледяного покрова на внутренних водоемах: первые оценки // Russian Journal of Earth Sciences. — 2025. — Т. 25. — ES3009. — DOI: 10.2205/2025es001020 — EDN: NZVMMR

Введение

В последние десятилетия происходит заметное изменение климата Земли и связанные с этим проблемы несут серьезные угрозы человечеству. Оценка скорости происходящих изменений становится одной из важнейших задач, стоящих перед учеными.

Одним из критериев, используемых для получения количественной оценки скорости этого процесса, является площадь морского льда в Арктике и Антарктике. Для измерения площади морского льда активно применяются дистанционные методы, способные обеспечить глобальное покрытие. Для выполнения оперативного мониторинга больших акваторий на аэрокосмические носители могут быть установлены радиометры, радиолокаторы с реальной и синтезированной апертурой, оптические и инфракрасные датчики [Дистанционное ..., 1984; Мельник и Зубкович, 1980; Радиолокационные ..., 2007; Halpern, 2000; Microwave ..., 1992]. Состав измерительной аппаратуры определяется решаемыми задачами.

Скаттерометры обеспечивают глобальное покрытие и благодаря широкой полосе обзора позволяют оперативно получать информацию о площади морского льда [Nekrasov et al., 2020b; Remund and Long, 2014; Rivas et al., 2012; Zhai et al., 2021]. Недостаток скаттерометров это низкое пространственное разрешение (стандартное – 25×25 км), что делает невозможным наблюдение небольших внутренних водоемов.

<https://elibrary.ru/NZVMMR>

Получено: 21 марта 2025 г.

Принято: 7 мая 2025 г.

Опубликовано: 13 мая 2025 г.



© 2025. Коллектив авторов.

Вторым инструментом глобального мониторинга морского льда является радиометр [Тухонов и др., 2014; Bremen University, 2025; Wu et al., 2023; Zabolotskikh, 2019]. Широкая полоса обзора радиометра обеспечивает оперативный сбор данных, однако его низкое пространственное разрешение не позволяет эффективно использовать эти данные для изучения небольших внутренних водоемов. Как и скаттерометр, радиометр определяет наличие морского льда и его сплоченность с ошибками [Животовская и др., 2019].

Оба метода обладают ошибками, поэтому развиваются методы, позволяющие повысить точность, используя в алгоритмах оба типа данных [Zhang et al., 2019].

Радиовысотомер измеряет форму отраженного импульса, которая зависит от геометрических характеристик подстилающей поверхности, поэтому является наиболее точным инструментом для мониторинга морского льда [Patel et al., 2015; Quartly et al., 2018].

Серьезным недостатком радиовысотомера является низкая повторяемость наблюдений (период около 10 суток) и большое расстояние между соседними треками (> 100 км) при размере пятна порядка 5–15 км. В связи с этим тоже развиваются алгоритмы, использующие дополнительно другие данные, например, скаттерометров [Rajkumar et al., 2015].

Большие внутренние водоемы, которые попадают в трек радиовысотомеров, тоже являются объектом исследования и разрабатываются специальные алгоритмы обработки, чтобы минимизировать влияние берегов водоема [Troitskaya et al., 2012, 2014].

Самым перспективным для мониторинга ледяного покрова считается радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), который способен обеспечить пространственное разрешение в несколько метров [Заболотских и др., 2023; Kim et al., 2012; Leigh et al., 2014; Zakhatkina et al., 2013]. Для повышения информативности, также применяется объединение данных разных сенсоров с данными РСА [Cooke and Scott, 2019; Karvonen, 2017]. Мультисенсорный подход активно развивается для решения самых разных задач.

В последнее время развиваются технологии мониторинга на основе сигналов глобальных навигационных систем [Ковалдов и др., 2024; Yan and Huang, 2016]. Недостатком этого подхода также является низкое пространственное разрешение (~ 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.

Для оценки эффективности дистанционных методов применяются контактные измерения или оптика [Дегай и др., 2021; Митник и Хазанова, 2019; König et al., 2021]. Их преимуществом является высокое пространственное разрешение, широкое покрытие и ежедневное получение снимков. Для получения оперативной информации с высоким пространственным разрешением можно использовать пассажирские и транспортные самолеты, если организовать обработку и передачу собираемой во время полета информации [Nekrasov et al., 2020a].

Измерения показывают, что в последние десятилетия наблюдается тенденция уменьшения площади морского льда. В качестве примера наблюдаемого «потепления» можно привести отсутствие многолетнего морского льда в российском секторе Арктики в последние годы. Для проведения исследований, разработана и изготовлена ледостойкая платформа «Северный полюс» [Лед тронулся ..., 2023].

Изменение климата проявляется не только в океане, но и на суше. Обзор ледовой обстановки на оз. Ладога более чем за 60 лет приведен в работе [Ладога, 2013]. Климатические изменения самого внутреннего водоема России обсуждаются в [Гинзбург и др., 2021].

Существующая в России сеть метеорологических и гидрологических постов позволяет получать достоверную информацию о температурном режиме и ледяном покрове внутренних водоемов в месте расположения поста, однако в настоящее время пространственное покрытие плохое и, особенно в малонаселенных регионах. Поэтому применение дистанционных методов является необходимым условием для получения

достоверной информации о происходящих климатических изменениях и оценке их скорости применительно к Земле в целом.

Недостатком оптических данных является влияние наличия облачности, которая часто присутствует в осенне-весенний период. За месяц может быть всего несколько дней, когда облачность отсутствует и на снимке будет видна поверхность Земли в момент пролета спутника.

Облачность не является помехой для радиолокационного зондирования и в этом случае основным информационным параметром является сечение обратного рассеяния. Различие в сечениях обратного рассеяния морского льда и морского волнения используется в алгоритмах обработки.

Для анализа ледовой обстановки на внутренних водоемах обычно используются РСА или оптика [Hall et al., 1994; Jeffries et al., 1994; Zhang et al., 2021].

В данном исследовании рассматривается зондирование при углах падения меньше 18° . При малых углах падения измерения выполняются двухчастотным радиолокатором (Dual-frequency Precipitation Radar – DPR), установленном на спутнике GPM (Global Precipitation Mission) [JAXA, 2014] и волновым скаттерометром SWIM (Surface Wave Investigation and Monitoring) [Hauser et al., 2017, 2021] на китайско-французском спутнике CFOSAT (Chinese-French Oceanic SATellite). Разработанные алгоритмы позволяют определять тип подстилающей поверхности «морской лед – морское волнение» [Karaev и др., 2020; Panfilova and Karaev, 2023, 2024]. Задача оценки сплоченности ледяного покрова является более сложной и находится на стадии исследования. DPR выполняет измерения в полосе $\pm 60^\circ$, что позволяет выполнять мониторинг на обширной территории с большим количеством внутренних водоемов.

Проведенные нами исследования показали, что при малых углах падения можно определить наличие ледяного покрова на внутренних водоемах [Karaev et al., 2018]. Однако размер исследуемых водоемов (оз. Ильмень, оз. Байкал) был существенно больше разрешения дождевого радиолокатора (5 км), что облегчало задачу.

Большинство внутренних водоемов, включая практически все реки, имеют размеры, сопоставимые с пространственным разрешением дождевого радиолокатора или даже меньшие, что затрудняет их надежное обнаружение и анализ.

В данной работе выполнено исследование «проявления» небольших (размер меньше разрешения радиолокатора) внутренних водоемов в радиолокационном изображении в осенне-весенний период. Обсуждается возможность мониторинга процесса формирования и разрушения ледяного покрова и, таким образом, измерения длительности существования ледяного покрова на внутренних водоемах.

Постановка задачи

Для анализа климатических изменений используются различные подходы, например, анализируется отклонение площади морского льда в текущем году от среднего значения. Такая зависимость приведена на рис. 1.

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.

В отношении небольших внутренних водоемов такой подход неприменим. В осенне-зимний период они покрываются льдом, а весной лед тает. В качестве критерия можно использовать длительность (период) «существования» ледяного покрова на внутренних водоемах. Изменение длительности будет говорить о динамике происходящих климатических изменений внутри материков. Такая информация есть по отдельным водоемам, например, Ладожскому озеру, но общая картина отсутствует, т.к. для большинства водоемов такая информация отсутствует.

Процесс замерзания и таяния ледяного покрова является «медленным» процессом и «сглаживает» кратковременные колебания температуры, т.е. длительность существования ледяного покрова является интегральной характеристикой. Кроме того, в этом

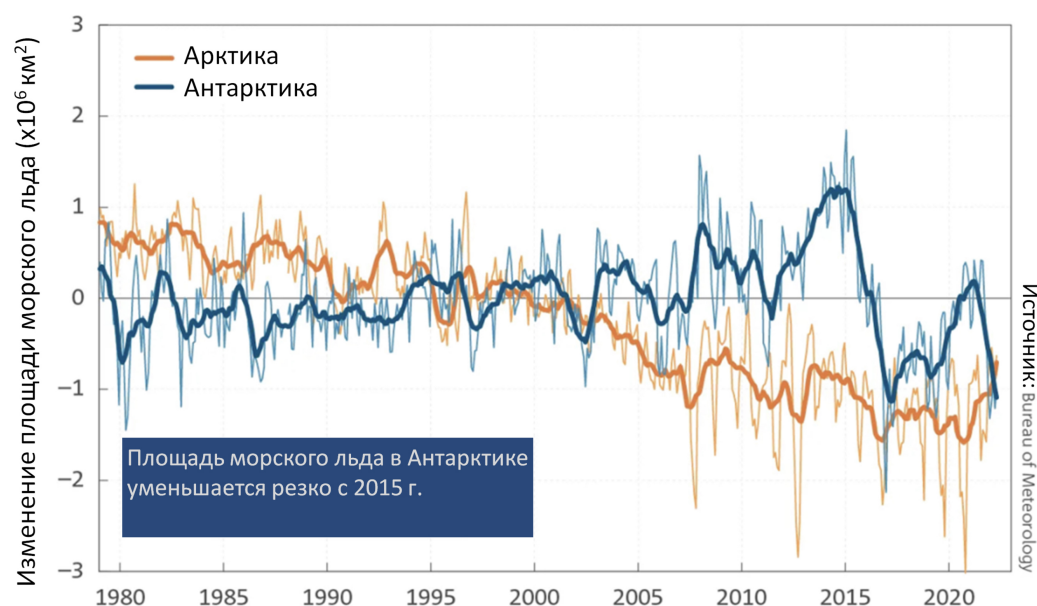


Рис. 1. Изменение площади морского льда в Арктическом и Антарктическом регионах [Bureau of Meteorology, 2024].

случае учитывается прямое влияние весеннего солнца (прямых солнечных лучей) на лед, а не только изменение температуры воздуха.

Небольшие размеры внутренних водоемов затрудняют применение скаттерометров, радиовысотометров и радиометров для мониторинга, а использование оптических средств затруднено наличием облачности в период формирования и разрушения ледяного покрова.

Еще одна причина для наблюдения за реками связана с весенним половодьем. Возникающие заторы на реках могут приводить к серьезным наводнениям, если они происходят вблизи населенных пунктов. Пример проведения такого мониторинга границы речного льда был представлен в ноябре 2024 на конференции в ИКИ РАН [Ромасько и др., 2024]. Авторы доклада использовали данные оптических сенсоров и показали, что разрушение ледяного покрова на реке происходит не одновременно и можно отследить движение границы льда по руслу при условии отсутствия облачности.

В нашем докладе [Караев и др., 2024] для проведения мониторинга ледяного покрова внутренних водоемов предлагалось использовать радиолокационные данные, и данная работа является дальнейшим развитием этого подхода.

В работе используются данные двухчастотного дождевого радиолокатора DPR, который установлен на спутнике GPM. Схема измерения показана на рис. 2. Измерения выполняются при малых углах падения ($\pm 18^\circ$) и формируется радиолокационное изображение шириной 245 км с разрешением около 5 км в Ku- и Ka-диапазонах (высота орбиты около 400 км) [JAXA, 2014]. Сканирование выполняется по углу падения в направлении перпендикулярном направлению движения спутника.

Размеры большинства внутренних водоемов на территории России (озера, реки) меньше элемента разрешения радиолокатора (5 км), что затрудняет задачу по сравнению с морским льдом. Однако при малых углах падения сечение обратного рассеяния водной поверхности существенно выше, чем у льда (за исключение вертикального зондирования). Было показано, что на «летнем» радиолокационном изображении «проявляются» реки шириной 400–500 м [Karaev et al., 2018].

В случае присутствия в элементе разрешения, формируемого антенной радиолокатора (диаграмма направленности $0,71^\circ \times 0,71^\circ$), ледяного покрова и водной поверхности,

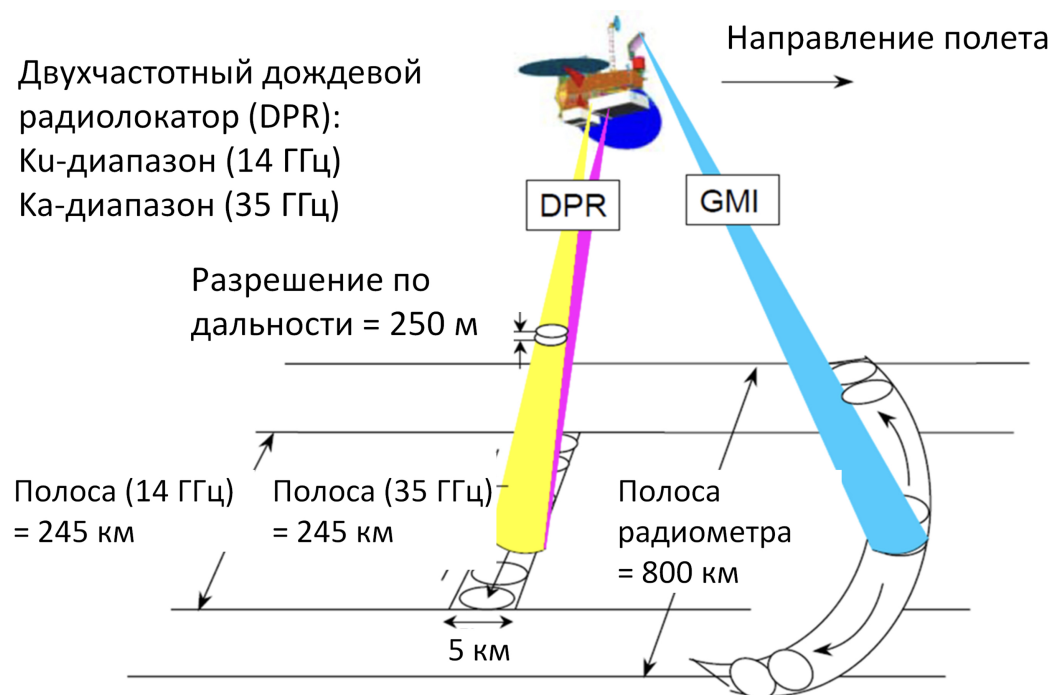


Рис. 2. Схема измерения спутника GPM. DPR выполняет сканирование в направлении перпендикулярном направлению полета в интервале углов падения $\pm 18^\circ$ [Panfilova et al., 2020].

сечение обратного рассеяния σ_0 , отраженного такой поверхностью, можно представить следующим образом:

$$\sigma_0(\theta_0) = \frac{\sigma_{0\text{ice}}(\theta_0)S_{\text{ice}}}{S_0} + \frac{\sigma_{0\text{water}}(\theta_0)(S_0 - S_{\text{ice}})}{S_0}, \quad (1)$$

где $\sigma_{0\text{ice}}$ и $\sigma_{0\text{water}}$ – сечение обратного рассеяния пресноводного льда и воды соответственно; S_0 – площадь элемента разрешения, формируемого антенной (footprint); S_{ice} – площадь льда внутри элемента разрешения.

Для морского льда эмпирическая зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения была измерена и ее можно использовать для моделирования, например, сплоченности ледяного покрова.

В отличие от морского льда, где толщина скин-слоя в Ku- и Ka-диапазонах меньше длины волны, толщина скин-слоя пресноводного льда может быть больше метра (зависит от длины электромагнитной волны). Следовательно, появляется еще один параметр, который надо учитывать при моделировании мощности отраженного сигнала. Также необходимо принимать во внимание минерализацию льда, оказывающую влияние на мнимую часть его относительной комплексной диэлектрической проницаемости. [Бордонский и др., 2014, 2024; Mätzler and Wegmüller, 1987].

Для пресноводного льда эмпирическая зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения была получена для оз. Байкал [Karaev et al., 2018]. Толщина льда на озере Байкал около 1 м и вопрос применимости этой зависимости к внутренним водоемам с более «тонким» льдом, когда необходимо учитывать отражение от поверхности воды, требует дополнительного исследования.

Данные радиовысотомеров (Ku-диапазон) используются для оценки толщины льда на пресноводных озерах. Зондирование выполняется вертикально вниз и отраженный импульс радиовысотомера содержит два пика: первый формируется отражением от верхней границы льда, а второй связан с отражением от водной поверхности, распо-

ложенной подо льдом [Mätzler and Wegmüller, 1987]. По расстоянию между пиками определяется толщина льда.

В ходе эксперимента, проведенного в ледовом опытовом бассейне Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) в период с декабря 2024 г. по февраль 2025 г., выполнялись измерения с использованием радиолокатора на длине волны 8 мм при малых углах падения и толщине льда до 55 см. В настоящее время данные обрабатываются, результаты будут опубликованы позднее.

В дальнейшем измеренная эмпирическая зависимость для пресноводного льда позволит по формуле (1) моделировать отражение от небольших внутренних водоемов и определять размер водоема, для которого можно обнаружить переход от водной поверхности к ледяному покрову и обратно.

Надо отметить, что сечение обратного рассеяния водной поверхности зависит от скорости приводного ветра, поэтому размер водоема, который может быть обнаружен на радиолокационном изображении, будет меняться в зависимости от погодных условий.

В нашем распоряжении есть данные DPR и, используя его радиолокационные изображения, можно проверить предположение о возможности определения времени существования ледяного покрова на небольших (меньше пространственного разрешения радиолокатора) внутренних водоемах.

Исходные данные

В качестве тестового полигона была выбрана река Волга на участке от г. Саратов до г. Волгоград. На рис. 3 показан рассматриваемый участок реки на карте Яндекс (слева) и на оптическом изображении MODIS (справа). В оптическом изображении присутствуют сильные геометрические искажения, связанные со схемой измерения (наклонная съемка).

Для первого исследования было решено использовать достаточно «большой» внутренний водоем и на этом участке р. Волга становится широкой и хорошо заметна на радиолокационном изображении. Задача определения площади водоема, который становится заметным на радиолокационном изображении, будет рассматриваться в дальнейших исследованиях. Для анализа использовались данные с 01.11.2021 по 01.09.2022.

Примеры радиолокационного изображения DPR за 19.12.2021 в Ки-диапазоне (слева) и в Ка-диапазоне (справа) приведены на рис. 4. Синей кривой показано русло р. Волга без учета ширины реки. Цвет соответствует измеренному сечению обратного рассеяния в дБ. Прямые линии на радиолокационном изображении проведены для углов: -16° , -12° , -8° , -4° , 4° , 8° , 12° , 16° .

На радиолокационном изображении река выделяется большим значением сечения обратного рассеяния по сравнению с сушей. В это время река свободна ото льда.

Разрезы радиолокационного изображения вдоль направления движения (прямые на рис. 4) приведены на рис. 5. Угол падения для разреза обозначен цифрами: 4° , 8° и т.д.

На рис. 5 по горизонтальной оси отложена восточная долгота в градусах, по вертикальной – сечение обратного рассеяния.

Из разрезов видно, что в данном случае во всем интервале углов падения можно «обнаружить» реку. Сечение обратного рассеяния зависит от скорости ветра, поэтому при слабом ветре и больших углах падения, высота «пигов», соответствующих реке, может значительно уменьшиться.

Интересный результат получился для углов 16° , 12° , 8° , 4° и -4° , -8° , -12° , -16° . Сечение обратного рассеяния в Ка-диапазоне оказалось меньше, чем в Ки-диапазоне и эта разность увеличивается с увеличением угла падения. Это хорошо видно и на радиолокационных изображениях (рис. 4). Пока нет однозначного ответа, с чем это связано и исследования в этом направлении будут продолжены.

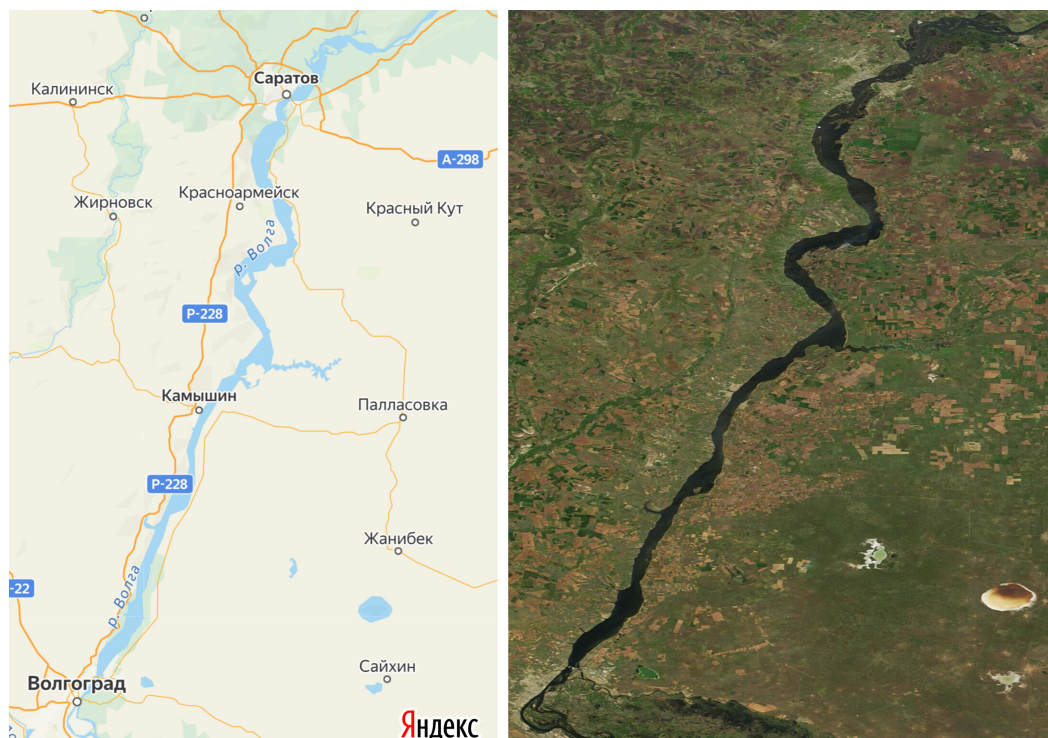


Рис. 3. Тестовый полигон на карте Яндекс (слева) и оптическое изображение MODIS (справа).

Обработка данных

Теперь рассмотрим радиолокационное изображение после формирования ледяного покрова на реке. В зимних условиях (наличие снежного покрова, отрицательная температура воздуха) сечение обратного рассеяния суши и реки, покрытой льдом, меняются. Пример «зимнего» радиолокационного изображения в Ку-диапазоне (слева) и Ка-диапазоне (справа) приведен на рис. 6 (7.01.2022).

По сравнению с рис. 4 отраженный сигнал стал сильнее для суши и меньше для реки, покрытой льдом. В результате нельзя определить на радиолокационном изображении положение реки.

На рис. 7 приведены разрезы для тех же углов падения и видно, что река стала «незаметной» на радиолокационном изображении, что говорит об изменении ее «состояния» – наличия ледяного покрова.

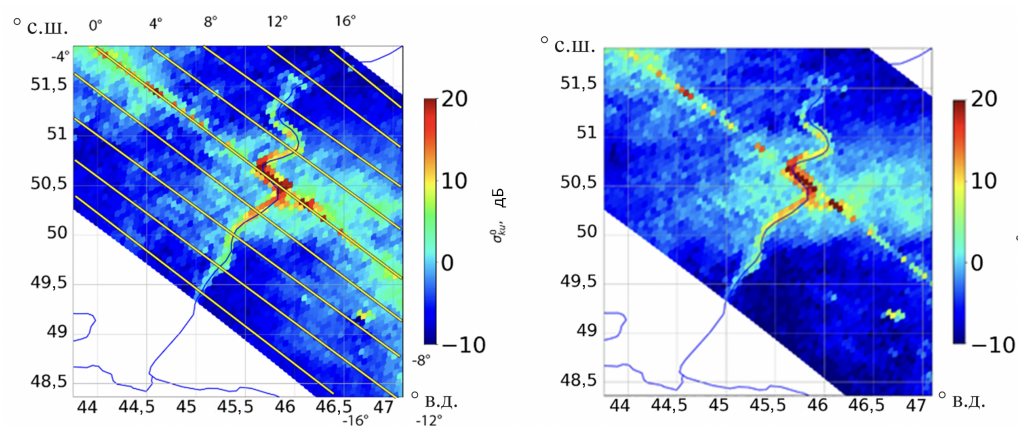


Рис. 4. Радиолокационное изображение в Ку-диапазоне (слева) и в Ка-диапазоне (справа) исследуемой области 19.12.2021.

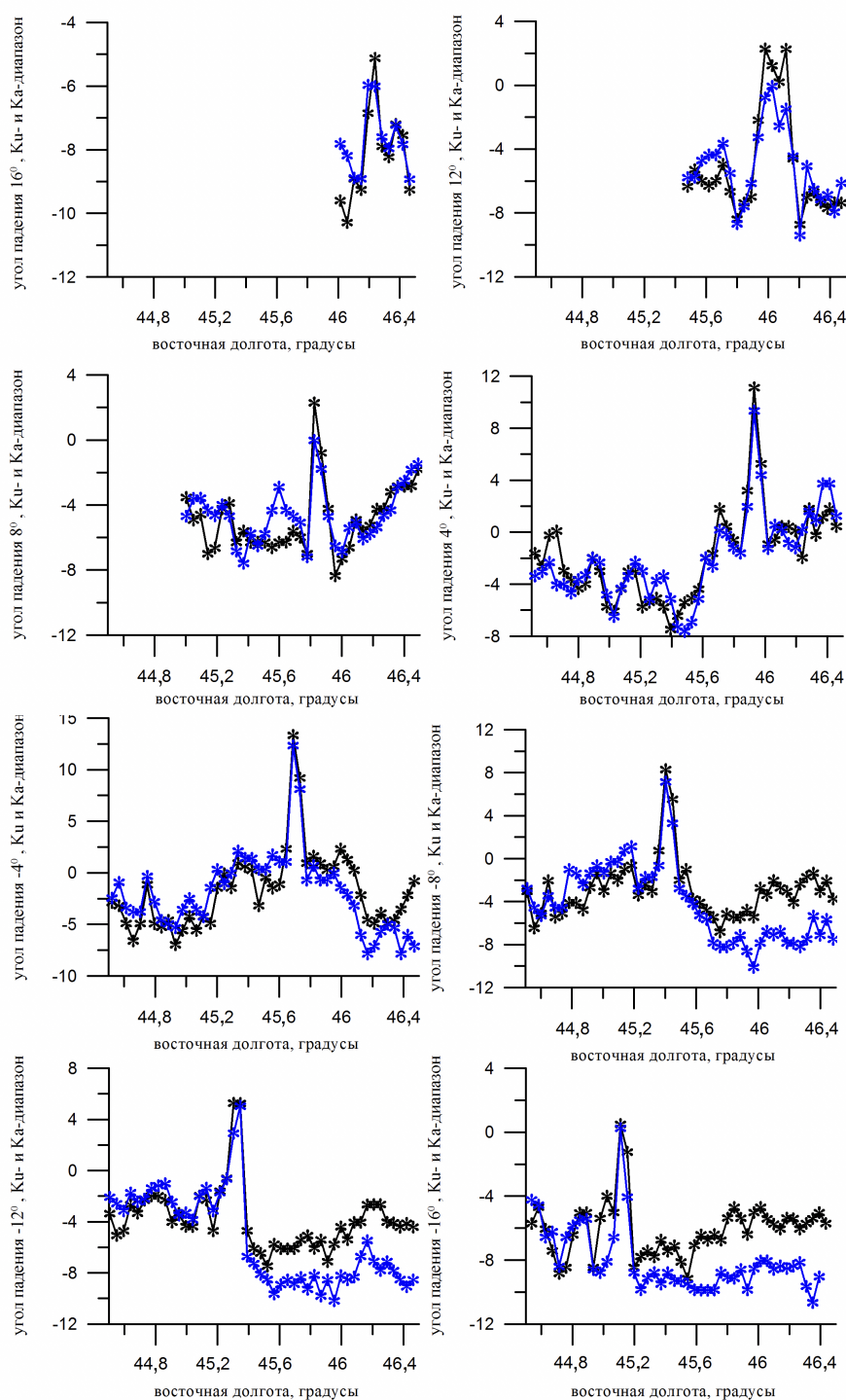


Рис. 5. Разрез радиолокационного изображения для углов падения 4° , 8° , 12° , 16° и -4° , -8° , -12° , -16° . Черным цветом показан Ku-диапазон, синим – Ka (19.12.2021). По вертикальной оси отложено сечение обратного рассеяния, дБ.

Таким образом, после формирования ледяного покрова река становится «незаметной» на радиолокационном изображении, что позволяет определить дату формирования ледяного покрова. «Появление» реки на радиолокационном изображении весной будет говорить о разрушении ледяного покрова. Таким образом, используя данные DPR можно оценить период существования ледяного покрова в исследуемом регионе. Рассто-

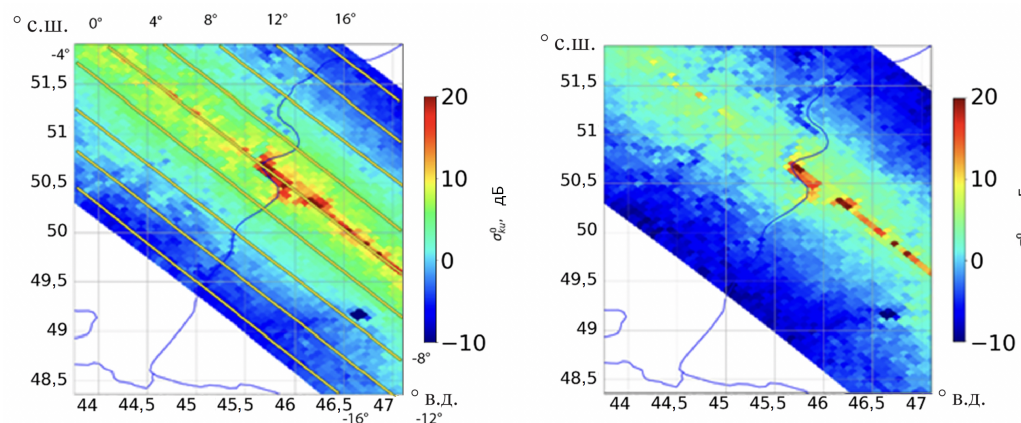


Рис. 6. Радиолокационное изображение исследуемой области 7.01.2022 в Ku-диапазоне (слева) и в Ka-диапазоне (справа).

яние между «разрезами» около 5 км, т.е. информация о наличии/отсутствии ледяного покрова будет собираться с таким шагом по реке.

На рис. 7 наблюдается различие сечений обратного рассеяния в Ku- и Ka-диапазонах для всех углов падения. Вероятно, что это связано с наличием снежного покрова. На длине волны 8 мм присутствует поглощение в снежном покрове, потому сечение обратного рассеяния отраженного сигнала будет слабее, чем в Ku-диапазоне, где затухание меньше. Кроме того, шероховатость поверхности в Ka-диапазоне выше, т.е. диаграмма рассеяния будет шире, чем в Ku-диапазоне, что также ослабляет отраженный сигнал. В дальнейшем будет выполнена проверка этого предположения и получена оценка эффективности критерия определения наличия/отсутствия снежного покрова по разнице сечения обратного рассеяния на двух длинах волн.

В заключение приведем радиолокационное изображение, которое было получено весной, когда река освободилась ото льда. На рис. 8 показаны радиолокационные изображения, полученные 4 апреля 2022 года: слева в Ku-диапазоне и справа в Ka-диапазоне.

Русло реки хорошо заметно на радиолокационных изображениях и это является надежным индикатором отсутствия льда.

Обсуждение результатов

Наклонение орбиты спутника GPM составляет 65° , поэтому для проведения мониторинга доступна большая часть внутренних водоемов на территории России и Канады. Полоса обзора радиолокатора достаточно узкая (245 км), поэтому частота повторения наблюдений выбранного участка будет меняться от двух раз в сутки до одного раза в 3 суток. Примерный период повторения орбиты (трека) составляет 7–8 дней. Преимущество орбиты состоит в том, что при вращении спутника происходит постепенное смещение трека и любой участок на поверхности попадет в полосу обзора в течении нескольких дней даже при относительно узкой ширине полосы обзора.

В полосе обзора DPR меняется угол падения, что может влиять на эффективность алгоритмов определения состояния внутренних водоемов (лед/вода). Этот эффект был рассмотрен при обработке.

При нулевом угле падения отражение от суши, ледяного покрова и водной поверхности имеют близкие значения сечения обратного рассеяния, что не позволяет проводить классификацию типов подстилающей поверхности. Это хорошо видно на рис. 4 и рис. 8.

На примере морского льда ранее было показано, что для классификации типа подстилающей поверхности лучше использовать углы падения больше 3° – 4° , т.е. узкая полоса вдоль трека не будет использоваться при обработке.

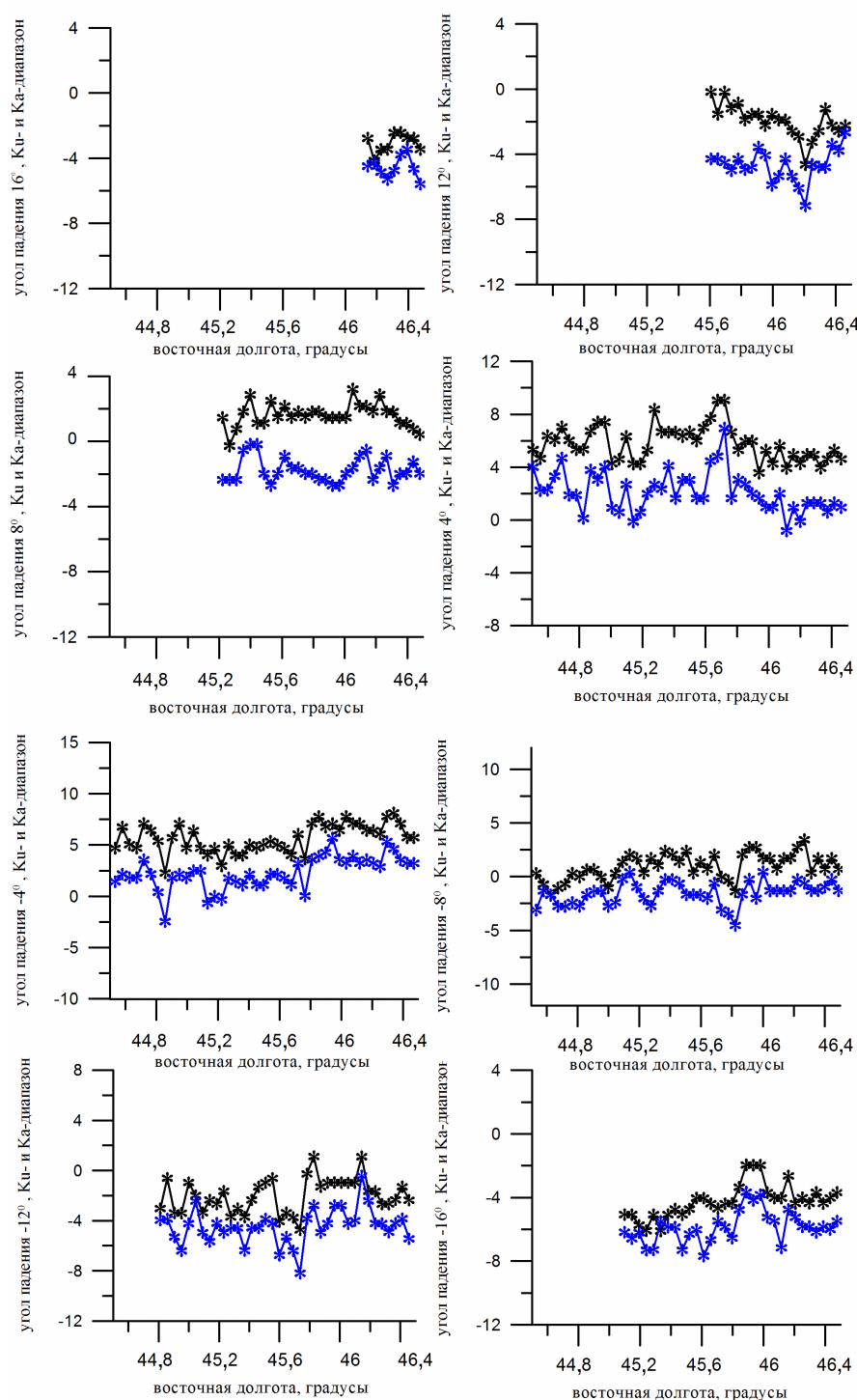


Рис. 7. Разрез радиолокационного изображения для углов падения 16° , 12° , 8° , 4° и -4° , -8° , -12° , -16° . Черным цветом показан Ku-диапазон, синим – Ka-диапазон. По вертикальной оси отложено сечение обратного рассеяния, дБ.

При дальнейшем увеличении угла падения река становится более «контрастной» и хорошо заметна на радиолокационном изображении. На рис. 5 (декабрь 2021) видно, что река «проявляется» для всех углов падения в полосе обзора. В этот время температура воздуха была отрицательной и на поверхности лежал снег.

В начале апреля температура воздуха была положительной, снег растаял и река снова видна на радиолокационном изображении, в том числе при больших углах

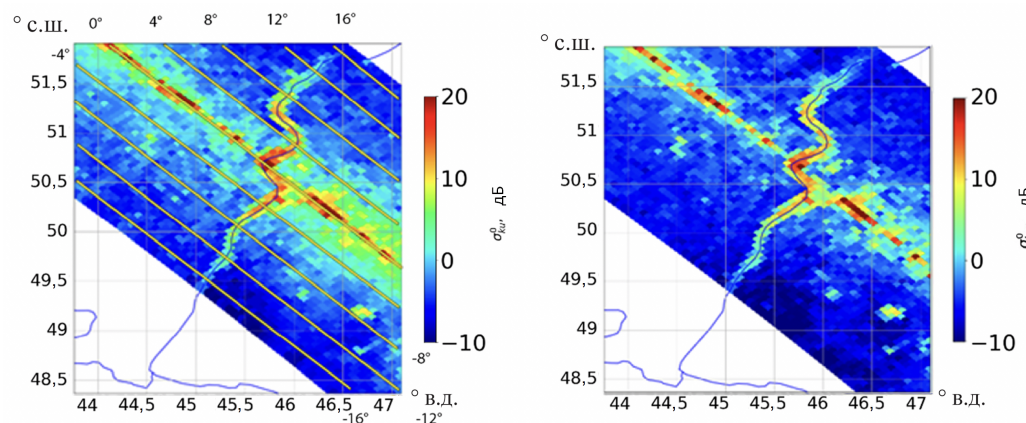


Рис. 8. Радиолокационное изображение 4 апреля 2022 года: Ку-диапазон (слева) и Ка-диапазон (справа).

падения (см. рис. 8 и рис. 9). В ходе дальнейших исследований будут уточнены условия и углы падения, когда предлагаемый подход будет эффективно работать.

Фактором, который также может влиять на работоспособность предлагаемого подхода, является скорость приводного ветра. При сильном ветре сечение обратного рассеяния водной поверхности при углах падения больше 10° будет увеличиваться, поэтому река станет лучше видна на краю полосы обзора.

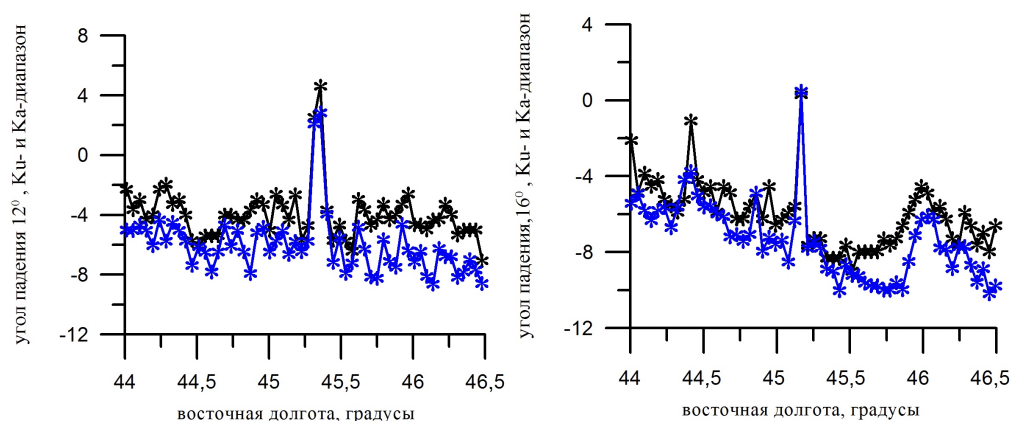


Рис. 9. Разрез радиолокационного изображения для углов падения -12° и -16° . Черным цветом показан Ку-диапазон, синим – Ка-диапазон. По вертикальной оси отложено сечение обратного рассеяния, дБ.

DPR выполняет измерения на двух частотах, что предоставляет дополнительную информацию о характеристиках отражающей поверхности и может применяться для решения других задач, в частности, наличии/отсутствии снежного покрова, растительности, рельефе, влажности почвы и, в том числе, переход температуры через ноль. Все эти направления будут рассмотрены в дальнейших исследованиях.

Выводы

В ходе проведенного исследования показано, что при малых углах падения ($< 18^\circ$), сечение обратного рассеяния водной поверхности существенно больше, чем сечение обратного рассеяния суши. Благодаря этому можно обнаруживать на радиолокационных изображениях внутренние водоемы, которые существенно меньше разрешения радиолокатора DPR. На рис. 4 приведены разрезы для разных углов падения и изменение сечения обратного рассеяния может достигать 8–12 дБ и зависит от угла падения.

На радиолокационном изображении внутренним водоемам соответствуют большие значения сечения обратного рассеяния. Однако при формировании ледяного покрова разница пропадает, и небольшие внутренние водоемы становятся незаметными на радиолокационном изображении.

На примере р. Волга в нижнем течении исследовано влияние ледяного покрова на радиолокационное изображение при малых углах падения. Приведены первые результаты обработки и показано, что почти во всей полосе обзора можно идентифицировать появление/исчезновение ледяного покрова на внутренних водоемах.

На эффективность метода будет влиять состояние окружающей среды, например, температура воздуха, осадки, скорость и направление ветра.

Важным преимуществом данных DPR по сравнению с планируемыми к запуску радиолокаторами является то, что измерения ведутся с 2014 года, поэтому можно анализировать не только будущие измерения, но и имеющийся массив информации за последние 10 лет, чтобы позволяет оценить тенденции изменения климата в разных регионах России и мира.

Таким образом, данное исследование является первым шагом в применении данных DPR для мониторинга ледяного покрова небольших внутренних водоемов и измерения длительности существования ледяного покрова.

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

Список литературы

- Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Крылов С. Д. Электромагнитные потери пресного льда в микроволновом диапазоне при 0°C // Радиотехника и электроника. — 2014. — Т. 59, № 6. — С. 587–592. — DOI: [10.7868/s0033849414060060](https://doi.org/10.7868/s0033849414060060).
- Бордонский Г. С., Казанцев В. А., Козлов А. К. Особенности диэлектрических характеристик льда вблизи температуры фазового перехода // Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». — Москва : Институт космических исследований РАН, 2024. — DOI: [10.21046/22DZZconf-2024a](https://doi.org/10.21046/22DZZconf-2024a).
- Гинзбург А., Костяной А., Серых И. и др. Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980-2020) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2021. — Т. 18, № 5. — С. 277–291. — DOI: [10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291).
- Дегай А. Ю., Андреев М., Егоров В. и др. Развитие методов автоматического распознавания ледового покрытия на основе спутниковых данных оптического и ближнего инфракрасного диапазона для системы мониторинга рыболовства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2021. — Т. 18, № 4. — С. 27–40. — DOI: [10.21046/2070-7401-2021-18-4-27-40](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-27-40).
- Дистанционное зондирование в метеорологии, океанографии и гидрологии / под ред. А. П. Крэкнелла. — Москва : Мир, 1984. — 535 с.
- Животовская М., Заболотских Е., Шапрон Б. Ложная диагностика морского льда в Арктике спутниковыми микроволновыми радиометрами в экстремальных погодных условиях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2019. — Т. 16, № 6. — С. 209–220. — DOI: [10.21046/2070-7401-2019-16-6-209-220](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-6-209-220).
- Заболотских Е. В., Хворостовский К. С., Животовская М. А. и др. Спутниковое микроволновое зондирование морского льда Арктики. Обзор // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2023. — Т. 20, № 1. — С. 9–34. — DOI: [10.21046/2070-7401-2023-20-1-9-34](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-1-9-34).
- Караев В. Ю., Панфилова М. А., Митник Л. М. и др. Особенности радиолокационного зондирования ледяного покрова при малых углах падения на примере Охотского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2020. — Т. 17, № 7. — С. 187–202. — DOI: [10.21046/2070-7401-2020-17-7-187-202](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-187-202).
- Караев В. Ю., Сорокин Е. С., Титченко Ю. А. и др. 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 : Институт космических исследований РАН, 2024. — С. 390. — DOI: [10.21046/22DZZconf-2024a](https://doi.org/10.21046/22DZZconf-2024a).

- Ковалдов Д. А., Титченко Ю. А., Караев В. Ю. и др. К вопросу об определении диаграммы рассеяния ледяного покрова по данным бистатического дистанционного зондирования в L-диапазоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2024. — Т. 21, № 6. — С. 294–308. — DOI: [10.21046/2070-7401-2024-21-6-294-308](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-6-294-308).
- Ладога / под ред. В. А. Румянцев, С. А. Кондратьева. — Санкт-Петербург : Нестор-История, 2013. — 468 с.
- Лед тронулся: Как уникальная платформа «Северный Полюс» помогает изучать Арктику. — 2023. — <https://clck.ru/3M2VjX>.
- Мельник Ю. А., Зубкович С. Г. Радиолокационные методы исследования Земли. — Москва : Советское радио, 1980. — 260 с.
- Митник Л., Хазанова Е. Радиолокационные, термические и оптические контрасты морского льда в Охотском море зимой // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2019. — Т. 16, № 5. — С. 255–267. — DOI: [10.21046/2070-7401-2019-16-5-255-267](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-5-255-267).
- Радиолокационные методы и средства оперативного дистанционного зондирования Земли с аэро-космических носителей / под ред. С. Н. Конюхова, В. И. Драновского, В. Н. Цымбала. — Киев : Авиадиагностика, 2007. — 440 с.
- Ромасько В. Ю., Гордеева О. С., Новикова О. Г. и др. Спутниковый мониторинг положения кромки льда на крупных реках Сибири // Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». — Москва : Институт космических исследований РАН, 2024. — С. 123. — DOI: [10.21046/22DZZconf-2024a](https://doi.org/10.21046/22DZZconf-2024a).
- Тихонов В., Репина И., Раев М. и др. Новый алгоритм восстановления сплошности морского ледяного покрова по данным пассивного микроволнового зондирования // Исследование Земли из космоса. — 2014. — № 2. — С. 35–43. — DOI: [10.7868/S0205961414020110](https://doi.org/10.7868/S0205961414020110).
- Bremen University. Sea Ice Portal. — 2025. — (visited on 29.04.2025). <https://www.seaice.uni-bremen.de/start/>.
- Bureau of Meteorology. State of the Climate 2024. Cryosphere. — 2024. — <http://www.bom.gov.au/state-of-the-climate/cryosphere.shtml>.
- Cooke C. L. V., Scott K. A. Estimating Sea Ice Concentration From SAR: Training Convolutional Neural Networks With Passive Microwave Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2019. — Vol. 57, no. 7. — P. 4735–4747. — DOI: [10.1109/TGRS.2019.2892723](https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2892723).
- Hall D., Fagre D., Klasner F., et al. Analysis of ERS 1 synthetic aperture radar data of frozen lakes in northern Montana and implications for climate studies // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 1994. — Vol. 99, no. C11. — P. 22473–22482. — DOI: [10.1029/94jc01391](https://doi.org/10.1029/94jc01391).
- Halpern D. Satellites, oceanography and society. — Elsevier, 2000. — 368 p.
- Hauser D., Tison C., Amiot T., et al. SWIM: The First Spaceborne Wave Scatterometer // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2017. — Vol. 55, no. 5. — P. 3000–3014. — DOI: [10.1109/tgrs.2017.2658672](https://doi.org/10.1109/tgrs.2017.2658672).
- Hauser D., Tourain C., Hermozo L., et al. New Observations From the SWIM Radar On-Board CFOSAT: Instrument Validation and Ocean Wave Measurement Assessment // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2021. — Vol. 59, no. 1. — P. 5–26. — DOI: [10.1109/TGRS.2020.2994372](https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.2994372).
- JAXA. GPM Data Utilization Handbook. Version 1.0. — Japan Aerospace Exploration Agency, 2014. — 92 p.
- Jeffries M., Morris K., Weeks W., et al. Structural and stratigraphic features and ERS 1 synthetic aperture radar backscatter characteristics of ice growing on shallow lakes in NW Alaska, winter 1991-1992 // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 1994. — Vol. 99, no. C11. — P. 22459–22471. — DOI: [10.1029/94jc01479](https://doi.org/10.1029/94jc01479).
- Karaev V., Panfilova M., Titchenko Yu., et al. Monitoring of Inland Waters by Dual-Frequency Precipitation Radar: First Results // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. — 2018. — Vol. 11, no. 11. — P. 4364–4372. — DOI: [10.1109/JSTARS.2018.2874697](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2874697).
- Karvonen J. Baltic Sea Ice Concentration Estimation Using SENTINEL-1 SAR and AMSR2 Microwave Radiometer Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2017. — Vol. 55, no. 5. — P. 2871–2883. — DOI: [10.1109/tgrs.2017.2655567](https://doi.org/10.1109/tgrs.2017.2655567).
- Kim J.-W., Kim D.-J., Hwang B. J. Characterization of Arctic Sea Ice Thickness Using High-Resolution Spaceborne Polarimetric SAR Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2012. — Vol. 50, no. 1. — P. 13–22. — DOI: [10.1109/tgrs.2011.2160070](https://doi.org/10.1109/tgrs.2011.2160070).
- Konig C., Konig T., Singha S., et al. Combined Use of Space Borne Optical and SAR Data to Improve Knowledge about Sea Ice for Shipping // Remote Sensing. — 2021. — Vol. 13, no. 23. — P. 4842. — DOI: [10.3390/rs13234842](https://doi.org/10.3390/rs13234842).

- Leigh S., Wing Z., Clausi D. Automated Ice-Water Classification Using Dual Polarization SAR Satellite Imagery // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2014. — Vol. 52, no. 9. — P. 5529–5539. — DOI: [10.1109/tgrs.2013.2290231](https://doi.org/10.1109/tgrs.2013.2290231).
- Mätzler C., Wegmüller U. Dielectric properties of freshwater ice at microwave frequencies // Journal of Physics D: Applied Physics. — 1987. — Vol. 20, no. 12. — P. 1623–1630. — DOI: [10.1088/0022-3727/20/12/013](https://doi.org/10.1088/0022-3727/20/12/013).
- Microwave Remote Sensing of Sea Ice / ed. by F. D. Carsey. — American Geophysical Union, 1992. — 462 p. — (Geophysical Monograph Series). — DOI: [10.1029/gm068](https://doi.org/10.1029/gm068).
- Nekrasov A., Khachaturian A., Abramov E., et al. On Sea Ice/Water Discrimination by Airborne Weather Radar // IEEE Access. — 2020a. — Vol. 8. — P. 120916–120922. — DOI: [10.1109/ACCESS.2020.3006617](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3006617).
- Nekrasov A., Khachaturian A., Labun J., et al. Towards the Sea Ice and Wind Measurement by a C-Band Scatterometer at Dual VV/HH Polarization: A Prospective Appraisal // Remote Sensing. — 2020b. — Vol. 12, no. 20. — P. 3382. — DOI: [10.3390/rs12203382](https://doi.org/10.3390/rs12203382).
- Panfilova M., Karaev V. Sea Ice Detection by an Unsupervised Method Using Ku- and Ka-Band Radar Data at Low Incidence Angles: First Results // Remote Sensing. — 2023. — Vol. 15, no. 14. — P. 3530. — DOI: [10.3390/rs15143530](https://doi.org/10.3390/rs15143530).
- Panfilova M., Karaev V. Sea Ice Detection Method Using the Dependence of the Radar Cross-Section on the Incidence Angle // Remote Sensing. — 2024. — Vol. 16, no. 5. — DOI: [10.3390/rs16050859](https://doi.org/10.3390/rs16050859).
- Panfilova M., Karaev V., Mitnik L., et al. Advanced View at the Ocean Surface // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2020. — Vol. 125, no. 11. — e2020JC016531. — DOI: <https://doi.org/10.1029/2020JC016531>.
- Patel A., Paden J., Leuschen C., et al. Fine-Resolution Radar Altimeter Measurements on Land and Sea Ice // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2015. — Vol. 53, no. 5. — P. 2547–2564. — DOI: [10.1109/tgrs.2014.2361641](https://doi.org/10.1109/tgrs.2014.2361641).
- Quartly G., Rinne R., Pissaro M., et al. Review of Radar Altimetry Techniques over the Arctic Ocean: Recent Progress and Future Opportunities for Sea Level and Sea Ice Research // The Cryosphere Discuss. Preprint. — 2018. — DOI: [10.5194/tc-2018-148](https://doi.org/10.5194/tc-2018-148).
- Rajkumar K., Maheshwari M., Pallipad J., et al. Concurrent Use of OSCAT and AltiKa to Characterize Antarctic Ice Surface Features // Marine Geodesy. — 2015. — Vol. 38, sup1. — P. 497–509. — DOI: [10.1080/01490419.2014.1001047](https://doi.org/10.1080/01490419.2014.1001047).
- Remund Q., Long D. A Decade of QuikSCAT Scatterometer Sea Ice Extent Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2014. — Vol. 52, no. 7. — P. 4281–4290. — DOI: [10.1109/tgrs.2013.2281056](https://doi.org/10.1109/tgrs.2013.2281056).
- Rivas M., Verspeek J., Verhoef A., et al. Bayesian Sea Ice Detection With the Advanced Scatterometer ASCAT // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2012. — Vol. 50, no. 7. — P. 2649–2657. — DOI: [10.1109/TGRS.2011.2182356](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2182356).
- Troitskaya Yu. I., Rybushkina G., Soustova I., et al. Adaptive retracking of Jason-1 altimetry data for inland waters: the example of the Gorky Reservoir // International Journal of Remote Sensing. — 2012. — Vol. 33, no. 23. — P. 7559–7578. — DOI: [10.1080/01431161.2012.685972](https://doi.org/10.1080/01431161.2012.685972).
- Troitskaya Yu. I., Rybushkina G. V., Soustova I. A., et al. Adaptive Retracking of Jason-1, 2 Satellite Altimetry Data for the Volga River Reservoirs // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. — 2014. — Vol. 7, no. 5. — P. 1603–1608. — DOI: [10.1109/jstars.2013.2267092](https://doi.org/10.1109/jstars.2013.2267092).
- Wu S., Shi L., Zou B., et al. Daily Sea Ice Concentration Product over Polar Regions Based on Brightness Temperature Data from the HY-2B SMR Sensor // Remote Sensing. — 2023. — Vol. 15, no. 6. — P. 1692. — DOI: [10.3390/rs15061692](https://doi.org/10.3390/rs15061692).
- Yan Q., Huang W. 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. — 2016. — Vol. 9, no. 10. — P. 4795–4801. — DOI: [10.1109/jstars.2016.2582690](https://doi.org/10.1109/jstars.2016.2582690).
- Zabolotskikh E. V. Review of Methods to Retrieve Sea-Ice Parameters from Satellite Microwave Radiometer Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. — 2019. — Vol. 55, no. 1. — P. 110–128. — DOI: [10.1134/s0001433818060166](https://doi.org/10.1134/s0001433818060166).
- Zakhatkina N. Yu., Alexandrov V. Yu., Johannessen O. N., et al. Classification of Sea Ice Types in ENVISAT Synthetic Aperture Radar Images // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2013. — Vol. 51, no. 5. — P. 2587–2600. — DOI: [10.1109/tgrs.2012.2212445](https://doi.org/10.1109/tgrs.2012.2212445).
- Zhai X., Wang Z., Zheng Z., et al. Sea Ice Monitoring with CFOSAT Scatterometer Measurements Using Random Forest Classifier // Remote Sensing. — 2021. — Vol. 13, no. 22. — P. 4686. — DOI: [10.3390/rs13224686](https://doi.org/10.3390/rs13224686).
- Zhang J., He P., Hu X., et al. Dynamic Lake Ice Movement on Lake Khovsgol, Mongolia, Revealed by Time Series Displacements from Pixel Offset with Sentinel-2 Optical Images // Remote Sensing. — 2021. — Vol. 13, no. 24. — P. 4979. — DOI: [10.3390/rs13244979](https://doi.org/10.3390/rs13244979).

Zhang Z., Yu Y., Li X., et al. Arctic Sea Ice Classification Using Microwave Scatterometer and Radiometer Data During 2002-2017 // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2019. — Vol. 57, no. 8. — P. 5319–5328. — DOI: [10.1109/TGRS.2019.2898872](https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2898872).

ON THE PROBLEM OF RADAR MONITORING OF ICE COVER FORMATION AND DESTRUCTION ON INLAND WATERS: FIRST ASSESSMENTS

V. Yu. Karaev^{*} , E. S. Sorokin, M. A. Panfilova , Yu. A. Titchenko , E. M. Meshkov , and D. A. Kovaldov 

A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhniy Novgorod, Russia

****Correspondence to:** Vladimir Karaev, volody@ipfran.ru.

Remote sensing methods are widely used to monitor ongoing climate change, and the area of sea ice in the Arctic and Antarctic is used as one of the criteria. The duration of ice cover on inland waters can be used to assess processes within continents. The small size of internal waters does not allow the use of traditional methods that have proven themselves well in marine conditions. This study considers the possibility of using dual-frequency precipitation radar data to detect ice formation and destruction on small inland waters. Due to the features of backscatter at small incidence angles ($< 18^\circ$), inland waters with sizes smaller than the radar resolution (5 km) are “visible” in radar images. Using the Volga River as an example, it is shown that water-ice and ice-water transitions can be detected when analyzing radar images, and thus, possible to estimate the duration of ice cover on inland waters.

Keywords: inland water, ice cover, dual-frequency precipitation radar, radar image, small incidence angles.

Citation: Karaev, V. Yu., E. S. Sorokin, M. A. Panfilova, Yu. A. Titchenko, E. M. Meshkov, and 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*, 25, ES3009, <https://doi.org/10.2205/2025ES001020>, EDN: NZVMMR

Received: 21 March 2025

Accepted: 7 May 2025

Published: 13 May 2025



© 2025. The Authors.

References

- AARI. The Ice Has Moved: How the Unique North Pole Platform Helps Study the Arctic. — 2023. — (In Russian). <https://clck.ru/3M2VjX>.
- Bordonskii G. S., Kazantsev V. A., Kozlov A. K. Features of Dielectric Characteristics of Ice Near the Phase Transition Temperature // Proceedings of the 22nd International Conference «Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa». — Moscow : Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 2024. — DOI: [10.21046/22DZZconf-2024a](https://doi.org/10.21046/22DZZconf-2024a). — (In Russian).
- Bordonsky G. S., Gurulev A. A., Krylov S. D. Electromagnetic loss of fresh ice in microwave range at a temperature of 0°C // Journal of Communications Technology and Electronics. — 2014. — Vol. 59, no. 6. — P. 536–540. — DOI: [10.1134/S1064226914060060](https://doi.org/10.1134/S1064226914060060).
- Bremen University. Sea Ice Portal. — 2025. — (visited on 29.04.2025). <https://www.seaice.uni-bremen.de/start/>.
- Bureau of Meteorology. State of the Climate 2024. Cryosphere. — 2024. — <http://www.bom.gov.au/state-of-the-climate/cryosphere.shtml>.
- Cooke C. L. V., Scott K. A. Estimating Sea Ice Concentration From SAR: Training Convolutional Neural Networks With Passive Microwave Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2019. — Vol. 57, no. 7. — P. 4735–4747. — DOI: [10.1109/TGRS.2019.2892723](https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2892723).
- Degay A. Yu., Andreev M., Egorov V., et al. Development of methods of automatic recognition of sea ice cover based on visible and near-infrared satellite data for fishery monitoring system // Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. — 2021. — Vol. 18, no. 4. — P. 27–40. — DOI: [10.21046/2070-7401-2021-18-4-27-40](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-27-40). — (In Russian).

- Ginzburg A., Kostyanoy A., Serykh I., et al. Climatic changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea (1980-2020) // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. — 2021. — Vol. 18, no. 5. — P. 277–291. — DOI: [10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291). — (In Russian).
- Hall D., Fagre D., Klasner F., et al. Analysis of ERS 1 synthetic aperture radar data of frozen lakes in northern Montana and implications for climate studies // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1994. — Vol. 99, no. C11. — P. 22473–22482. — DOI: [10.1029/94jc01391](https://doi.org/10.1029/94jc01391).
- Halpern D. *Satellites, oceanography and society*. — Elsevier, 2000. — P. 368.
- Hauser D., Tison C., Amiot T., et al. SWIM: The First Spaceborne Wave Scatterometer // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. — 2017. — Vol. 55, no. 5. — P. 3000–3014. — DOI: [10.1109/tgrs.2017.2658672](https://doi.org/10.1109/tgrs.2017.2658672).
- Hauser D., Tourain C., Hermozo L., et al. New Observations From the SWIM Radar On-Board CFOSAT: Instrument Validation and Ocean Wave Measurement Assessment // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. — 2021. — Vol. 59, no. 1. — P. 5–26. — DOI: [10.1109/TGRS.2020.2994372](https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.2994372).
- JAXA. *GPM Data Utilization Handbook*. Version 1.0. — Japan Aerospace Exploration Agency, 2014. — P. 92.
- Jeffries M., Morris K., Weeks W., et al. Structural and stratigraphic features and ERS 1 synthetic aperture radar backscatter characteristics of ice growing on shallow lakes in NW Alaska, winter 1991-1992 // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1994. — Vol. 99, no. C11. — P. 22459–22471. — DOI: [10.1029/94jc01479](https://doi.org/10.1029/94jc01479).
- Karaev V. Yu., Panfilova M., Titchenko Yu., et al. Monitoring of Inland Waters by Dual-Frequency Precipitation Radar: First Results // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. — 2018. — Vol. 11, no. 11. — P. 4364–4372. — DOI: [10.1109/JSTARS.2018.2874697](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2874697).
- Karaev V. Yu., Panfilova M. A., Mitnik L. M., et al. Features of radar probing of ice cover at small incidence angles by the example of the Okhotsk Sea // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. — 2020. — Vol. 17, no. 7. — P. 187–202. — DOI: [10.21046/2070-7401-2020-17-7-187-202](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-187-202). — (In Russian).
- Karaev V. Yu., Sorokin E. S., Titchenko Yu. A., et al. On the Use of Dual-Frequency Rain Radar Data for Monitoring Ice Cover of Inland Waters // *Proceedings of the 22nd International Conference «Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa»*. — Moscow : Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 2024. — P. 390. — DOI: [10.21046/22DZZconf-2024a](https://doi.org/10.21046/22DZZconf-2024a). — (In Russian).
- Karvonen J. Baltic Sea Ice Concentration Estimation Using SENTINEL-1 SAR and AMSR2 Microwave Radiometer Data // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. — 2017. — Vol. 55, no. 5. — P. 2871–2883. — DOI: [10.1109/tgrs.2017.2655567](https://doi.org/10.1109/tgrs.2017.2655567).
- Kim J.-W., Kim D.-J., Hwang B. J. Characterization of Arctic Sea Ice Thickness Using High-Resolution Spaceborne Polarimetric SAR Data // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. — 2012. — Vol. 50, no. 1. — P. 13–22. — DOI: [10.1109/tgrs.2011.2160070](https://doi.org/10.1109/tgrs.2011.2160070).
- Konig C., Konig T., Singha S., et al. Combined Use of Space Borne Optical and SAR Data to Improve Knowledge about Sea Ice for Shipping // *Remote Sensing*. — 2021. — Vol. 13, no. 23. — P. 4842. — DOI: [10.3390/rs13234842](https://doi.org/10.3390/rs13234842).
- Kovaldov D. A., Titchenko Yu. A., Karaev V. Yu., et al. On the issue of determining the scattering diagram of ice cover using bistatic remote sensing data in the L-band // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. — 2024. — Vol. 21, no. 6. — P. 294–308. — DOI: [10.21046/2070-7401-2024-21-6-294-308](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-6-294-308). — (In Russian).
- Ladoga / ed. by V. A. Rumyantseva, S. A. Kondratieva. — Saint Petersburg : Nestor-Istoriya, 2013. — P. 468. — (In Russian).
- Leigh S., Wing Z., Clausi D. Automated Ice-Water Classification Using Dual Polarization SAR Satellite Imagery // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. — 2014. — Vol. 52, no. 9. — P. 5529–5539. — DOI: [10.1109/tgrs.2013.2290231](https://doi.org/10.1109/tgrs.2013.2290231).
- Mätzler C., Wegmüller U. Dielectric properties of freshwater ice at microwave frequencies // *Journal of Physics D: Applied Physics*. — 1987. — Vol. 20, no. 12. — P. 1623–1630. — DOI: [10.1088/0022-3727/20/12/013](https://doi.org/10.1088/0022-3727/20/12/013).
- Melnik Yu. A., Zubkovich S. G. *Radar Methods of Earth Exploration*. — Moscow : Sovetskoye radio, 1980. — P. 260. — (In Russian).
- Microwave Remote Sensing of Sea Ice* / ed. by F. D. Carsey. — American Geophysical Union, 1992. — P. 462. — (Geophysical Monograph Series). — DOI: [10.1029/gm068](https://doi.org/10.1029/gm068).
- Mitnik L., Khazanova E. Radar, thermal and optical contrasts of sea ice in the Sea of Okhotsk during winter // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. — 2019. — Vol. 16, no. 5. — P. 255–267. — DOI: [10.21046/2070-7401-2019-16-5-255-267](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-5-255-267). — (In Russian).
- Nekrasov A., Khachaturian A., Abramov E., et al. On Sea Ice/Water Discrimination by Airborne Weather Radar // *IEEE Access*. — 2020a. — Vol. 8. — P. 120916–120922. — DOI: [10.1109/ACCESS.2020.3006617](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3006617).

- Nekrasov A., Khachaturian A., Labun J., et al. Towards the Sea Ice and Wind Measurement by a C-Band Scatterometer at Dual VV/HH Polarization: A Prospective Appraisal // *Remote Sensing*. — 2020b. — Vol. 12, no. 20. — P. 3382. — DOI: [10.3390/rs12203382](https://doi.org/10.3390/rs12203382).
- Panfilova M., Karaev V. Sea Ice Detection by an Unsupervised Method Using Ku- and Ka-Band Radar Data at Low Incidence Angles: First Results // *Remote Sensing*. — 2023. — Vol. 15, no. 14. — P. 3530. — DOI: [10.3390/rs15143530](https://doi.org/10.3390/rs15143530).
- Panfilova M., Karaev V. Sea Ice Detection Method Using the Dependence of the Radar Cross-Section on the Incidence Angle // *Remote Sensing*. — 2024. — Vol. 16, no. 5. — DOI: [10.3390/rs16050859](https://doi.org/10.3390/rs16050859).
- Panfilova M., Karaev V., Mitnik L., et al. Advanced View at the Ocean Surface // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2020. — Vol. 125, no. 11. — e2020JC016531. — DOI: <https://doi.org/10.1029/2020JC016531>.
- Patel A., Paden J., Leuschen C., et al. Fine-Resolution Radar Altimeter Measurements on Land and Sea Ice // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. — 2015. — Vol. 53, no. 5. — P. 2547–2564. — DOI: [10.1109/tgrs.2014.2361641](https://doi.org/10.1109/tgrs.2014.2361641).
- Quartly G., Rinne R., Pissaro M., et al. Review of Radar Altimetry Techniques over the Arctic Ocean: Recent Progress and Future Opportunities for Sea Level and Sea Ice Research // *The Cryosphere Discuss. Preprint*. — 2018. — DOI: [10.5194/tc-2018-148](https://doi.org/10.5194/tc-2018-148).
- Radar methods and means of operational remote sensing of the Earth from aerospace carriers / ed. by S. N. Konyukhov, V. I. Dranovsky, V. N. Tsymbal. — Kyiv : Aviadiagnostika, 2007. — P. 440. — (In Russian).
- Rajkumar K., Maheshwari M., Pallipad J., et al. Concurrent Use of OSCAT and AltiKa to Characterize Antarctic Ice Surface Features // *Marine Geodesy*. — 2015. — Vol. 38, sup1. — P. 497–509. — DOI: [10.1080/01490419.2014.1001047](https://doi.org/10.1080/01490419.2014.1001047).
- Remote Sensing in Meteorology, Oceanography and Hydrology / ed. by A. P. Cracknell. — Moscow : Mir, 1984. — P. 535. — (In Russian).
- Remund Q., Long D. A Decade of QuikSCAT Scatterometer Sea Ice Extent Data // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. — 2014. — Vol. 52, no. 7. — P. 4281–4290. — DOI: [10.1109/tgrs.2013.2281056](https://doi.org/10.1109/tgrs.2013.2281056).
- Rivas M., Verspeek J., Verhoef A., et al. Bayesian Sea Ice Detection With the Advanced Scatterometer ASCAT // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. — 2012. — Vol. 50, no. 7. — P. 2649–2657. — DOI: [10.1109/TGRS.2011.2182356](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2182356).
- Romas'ko V. Yu., Gordeeva O. S., Novikova O. G., et al. Satellite Monitoring of the Ice Edge Position on Large Rivers of Siberia // *Proceedings of the 22nd International Conference «Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa»*. — Moscow : Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 2024. — P. 123. — DOI: [10.21046/22DZZconf-2024a](https://doi.org/10.21046/22DZZconf-2024a). — (In Russian).
- Tikhonov V., Repina I., Raev M., et al. New Algorithm Sea Ice Cover Reconstruction on the Basis of Passive Microwave Data // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*. — 2014. — No. 2. — P. 35–43. — DOI: [10.7868/S0205961414020110](https://doi.org/10.7868/S0205961414020110). — (In Russian).
- Troitskaya Yu. I., Rybushkina G., Soustova I., et al. Adaptive retracking of Jason-1 altimetry data for inland waters: the example of the Gorky Reservoir // *International Journal of Remote Sensing*. — 2012. — Vol. 33, no. 23. — P. 7559–7578. — DOI: [10.1080/01431161.2012.685972](https://doi.org/10.1080/01431161.2012.685972).
- Troitskaya Yu. I., Rybushkina G. V., Soustova I. A., et al. Adaptive Retracking of Jason-1, 2 Satellite Altimetry Data for the Volga River Reservoirs // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. — 2014. — Vol. 7, no. 5. — P. 1603–1608. — DOI: [10.1109/jstars.2013.2267092](https://doi.org/10.1109/jstars.2013.2267092).
- Wu S., Shi L., Zou B., et al. Daily Sea Ice Concentration Product over Polar Regions Based on Brightness Temperature Data from the HY-2B SMR Sensor // *Remote Sensing*. — 2023. — Vol. 15, no. 6. — P. 1692. — DOI: [10.3390/rs15061692](https://doi.org/10.3390/rs15061692).
- Yan Q., Huang W. 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*. — 2016. — Vol. 9, no. 10. — P. 4795–4801. — DOI: [10.1109/jstars.2016.2582690](https://doi.org/10.1109/jstars.2016.2582690).
- Zabolotskikh E. V. Review of Methods to Retrieve Sea-Ice Parameters from Satellite Microwave Radiometer Data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. — 2019. — Vol. 55, no. 1. — P. 110–128. — DOI: [10.1134/S0001433818060166](https://doi.org/10.1134/S0001433818060166).
- Zabolotskikh E. V., Hvorostovsky K. S., Zhivotovskaya M. A., et al. Satellite microwave remote sensing of the Arctic sea ice. Review // *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. — 2023. — Vol. 20, no. 1. — P. 9–34. — DOI: [10.21046/2070-7401-2023-20-1-9-34](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-1-9-34). — (In Russian).
- Zakhatkina N. Yu., Alexandrov V. Yu., Johannessen O. N., et al. Classification of Sea Ice Types in ENVISAT Synthetic Aperture Radar Images // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. — 2013. — Vol. 51, no. 5. — P. 2587–2600. — DOI: [10.1109/tgrs.2012.2212445](https://doi.org/10.1109/tgrs.2012.2212445).

- Zhai X., Wang Z., Zheng Z., et al. Sea Ice Monitoring with CFOSAT Scatterometer Measurements Using Random Forest Classifier // Remote Sensing. — 2021. — Vol. 13, no. 22. — P. 4686. — DOI: [10.3390/rs13224686](https://doi.org/10.3390/rs13224686).
- Zhang J., He P., Hu X., et al. Dynamic Lake Ice Movement on Lake Khovsgol, Mongolia, Revealed by Time Series Displacements from Pixel Offset with Sentinel-2 Optical Images // Remote Sensing. — 2021. — Vol. 13, no. 24. — P. 4979. — DOI: [10.3390/rs13244979](https://doi.org/10.3390/rs13244979).
- Zhang Z., Yu Y., Li X., et al. Arctic Sea Ice Classification Using Microwave Scatterometer and Radiometer Data During 2002-2017 // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2019. — Vol. 57, no. 8. — P. 5319–5328. — DOI: [10.1109/TGRS.2019.2898872](https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2898872).
- Zhivotovskaya M., Zabolotskikh E., Chapron B. Spurious Arctic sea ice identification by satellite microwave radiometers under extreme weather conditions // Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. — 2019. — Vol. 16, no. 6. — P. 209–220. — DOI: [10.21046/2070-7401-2019-16-6-209-220](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-6-209-220). — (In Russian).