

Использование данных спутниковых микроволновых радиометров для определения дат замерзания и очищения ото льда внутренних водоёмов на примере Верхнетуломского водохранилища Мурманской области

Е. В. Заболотских^{1,2}, К. И. Ярусов¹, И. М. Лазарева²,
О. И. Ляш², Г. С. Шелегов^{3,2}

¹ *Российский государственный гидрометеорологический университет
Санкт-Петербург, 192007, Россия
E-mail: liza@rshu.ru*

² *Мурманский арктический университет, Мурманск, 183038, Россия*

³ *Главное управление МЧС РФ по Мурманской обл., Мурманск, 183053, Россия*

Предложен метод определения дат замерзания и очищения ото льда внутренних водоёмов по данным поляризационных измерений спутниковых микроволновых радиометров на частоте ~90 ГГц. На примере Верхнетуломского водохранилища Мурманской области и измерений спутникового микроволнового радиометра AMSR2 (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) показано, что анализ временных серий поляризационных измерений AMSR2 на частоте 89 ГГц позволяет определять сроки начала таяния льда, полного очищения ото льда, начала ледостава и полного замерзания для водоёмов с масштабами, превышающими 100 км². Измерения AMSR2 поляризационной разницы радиояркостной температуры микроволнового излучения системы «подстилающая поверхность – атмосфера» над водохранилищем проанализированы за период январь 2020 – июль 2024 г. Результаты исследования поляризационной разницы показали, что её среднее значение и изменчивость в зимний период (декабрь – май) примерно в три раза ниже, чем в летний (июнь – ноябрь). Эти различия, совместно с априорной информацией о ледовых явлениях, позволили предложить методику полуавтоматического определения сроков начала таяния льда на водохранилище, полного его очищения ото льда, начала ледостава и полного замерзания водохранилища. Проведена проверка работоспособности методики с помощью отчётов гидрометслужбы о состоянии водных объектов Мурманской области и снимков радиолокатора с синтезированной апертурой спутника Sentinel-1. Использование данных дистанционного зондирования позволяет получить пространственно распределённую картину состояния льда на водохранилище для обеспечения Мурманского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды информацией о ледовых явлениях на водохранилище и представляется существенно менее затратной и более точной альтернативой использованию данных гидрометеорологических станций.

Ключевые слова: спутниковые данные, лёд внутренних водоёмов, Мурманская область, временные ряды, AMSR2

Одобрена к печати: 18.10.2024
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-165-177

Введение

Процессы ледообразования и таяния льда внутренних озёр и водохранилищ определяются физико-географическими особенностями водосбора, гидрометеорологическим режимом, морфометрическими и гидродинамическими характеристиками, а также антропогенным воздействием (Калинин, Калинин, 2013). Повышение оправдываемости прогнозов сроков начала ледостава и полного освобождения озёр ото льда позволяет увеличить эффективность планирования народно-хозяйственной деятельности, связанной с использованием озёр и водохранилищ для транспортных перевозок, рыбного промысла, строительных работ с воды и льда и т. д. (Сутырина, 2017). В Советском Союзе получили развитие и применение методы долгосрочных прогнозов, основанные на исследовании атмосферных процессов,

обуславливающих ледовые явления, и выявлении зависимости сроков ледовых явлений от количественных характеристик эволюции атмосферных процессов в предшествующие месяцы (Георгиевский, 1986; Георгиевский, Шаночкин, 2007). В свою очередь, сами сроки ледовых явлений выявлялись на метеорологических станциях и гидрографических постах (Попов, 1968).

В последние десятилетия с развитием методов спутникового дистанционного зондирования и расширением сферы их научного и практического применения изучение внутренних водоёмов может быть основано на спутниковых данных (Сутырина, 2014а, б). Одним из безусловных преимуществ использования спутниковой информации стала возможность картирования геофизических параметров и получения сведений для больших площадей. Так, в работе (Сутырина, 2017) с применением спутниковых данных были определены крайние и средние даты и межгодовая изменчивость сроков полного очищения ото льда Красноярского, Иркутского, Братского и Усть-Илимского водохранилищ за период 1998–2016 гг. Автор использовала в исследовании наблюдения спектральных радиометров AVHRR (*англ.* Advanced Very High Resolution Radiometer) и MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Объективность и однозначность в интерпретации спутниковых снимков в оптическом диапазоне выступают несомненными достоинствами этих данных: изображение льда на них близко к воспринимаемому человеческим глазом (Dgüe, Heinemann, 2004). Однако возможности оптического диапазона весьма ограничены — в облачную погоду получение информации о поверхности невозможно (Chan, Comiso, 2012).

Перспектива всепогодного (не зависящего от облачности) круглосуточного наблюдения за состоянием озёр и водохранилищ обеспечивается измерениями спутниковых микроволновых радиометров. Для морей Арктики эти измерения дают возможность идентифицировать тип поверхности (Comiso et al., 2003), выделять некоторые типы льда (однолетний, многолетний) (Grenfell et al., 1998), а также оценивать температуру и другие параметры ледяного покрова (например, толщину тонкого льда (Tian-Kunze et al., 2014)). Низкая степень поляризованности излучения льда по сравнению с излучением морской воды на частотах вблизи 90 ГГц (Spreen et al., 2008) позволяет строить карты сплочённости льда с разрешением 3×3 км (Заболотских и др., 2019). Такое высокое (для радиометрических продуктов) разрешение достигается за счёт использования спутниковых измерений современного японского микроволнового радиометра AMSR2 (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) уровня 1R (*англ.* Level 1R) двумя парами рупоров антенн. Эти пары обеспечивают смещение полос сканирования на каналах 89 ГГц и повышение за счёт этого пространственного разрешения (Imaoka et al., 2010). Несмотря на то, что для диапазона частот 1...100 ГГц коэффициент микроволнового излучения льда существенно выше коэффициента излучения открытой воды, использование измерений радиояркостной температуры (T_d) на одной поляризации для классификации поверхности по типу лёд/вода эффективно лишь для низкочастотного диапазона (для каналов измерений AMSR2 это частоты 6,9 и 10,65 ГГц). На частоте 89 ГГц влияние атмосферных параметров влагосодержания (влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков) на общее излучение системы подстилающая поверхность — атмосфера настолько существенно, что разделение на лёд и воду без использования измерений на более низких частотах (с более низким пространственным разрешением) невозможно. Пространственное разрешение стандартных ледовых геофизических продуктов, основанных на измерениях микроволновых радиометров, существенно ниже разрешения спектральных радиометров с каналами оптического и инфракрасного диапазона и составляет десятки и сотни квадратных километров. В то же время при использовании данных AMSR2 оригинального разрешения появляется возможность существенно повысить пространственное разрешение и применить их для исследования внутренних водоёмов с масштабами, превышающими 100 км^2 (по 3 км на прибрежную зону, измерения над которой из-за влияния суши на регистрируемое излучение не могут быть однозначно интерпретированы).

В настоящей работе продемонстрирована возможность использования данных AMSR2 для определения дат замерзания и очищения ото льда Верхнетуломского водохранилища (ВВ) Мурманской области.

Верхнетуломское водохранилище

Верхнетуломское водохранилище — одно из наиболее крупных водохранилищ Мурманской области. Находится на реке Туломе и включает в себя небольшое озеро Нотозеро. Площадь водного зеркала 745 км². Водоохранилище осуществляет многолетнее регулирование стока и является регулирующим водохранилищем каскада Туломских гидроэлектростанций. Оно создано в интересах энергетики, лесосплава, рыболовства и водоснабжения. Водоохранилище было заполнено в 1965 г., и его воды помогли наладить снабжение близлежащих населённых пунктов. На водохранилище расположен посёлок Верхнетуломский. Во время создания резервуара затопили территорию в 200 га, которая ранее использовалась для сельскохозяйственных угодий (Ресурсы..., 1969). Вокруг водохранилища нет благоустроенных дорог. Единственная и труднодоступная метеостанция «Ниванкюль» расположена на левом берегу Верхнетуломского водохранилища, в 50 км к юго-западу от посёлка Верхнетуломского. Метеоплощадка находится на поляне среди тайги в 160 м от берега водохранилища. До станции можно добраться вертолётом, речным транспортом или на снегоходе в зависимости от времени года. Информация с этой станции каждые три часа уходит на гидрометеорологическую станцию (ГМС) Падун, расположенную в посёлке Верхнетуломский, а оттуда в Мурманское УГМС (Мурманское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды). Данные ГМС «Ниванкюль» об уровне и температуре воды, о ледовых явлениях используются для прогнозирования притока воды в Верхнетуломское водохранилище и необходимы для планирования работы Кольской энергетической системы. Учитывая труднодоступность станции, всё необходимое на неё завозят на целый год в период навигации. Возможность использования данных дистанционного зондирования для обеспечения Мурманского УГМС информацией о ледовых явлениях на водохранилище представляется насущной необходимостью и существенно менее затратной альтернативой использованию данных ГМС. Кроме того, применение спутниковой информации обеспечивает получение пространственно распределённой картины состояния льда на водохранилище.

Методология и данные

В работе использовались данные измерений японского спутникового микроволнового радиометра AMSR2 Level 1R. Радиометр AMSR2, размещённый на спутнике GCOM-W1 (*англ.* Global Change Observation Mission — Water 1), был запущен в 2012 г. на замену радиометру AMSR-E на спутнике Aqua, проработавшему с 2002 по 2011 г. Радиометр AMSR2 имеет аналогичные AMSR-E характеристики, за исключением пары дополнительных каналов в С-диапазоне, улучшенную калибровку и повышенное пространственное разрешение. AMSR2 регистрирует уходящее микроволновое излучение на семи частотах (6,925; 7,3; 10,65; 18,7; 23,8; 36,5 и 89 ГГц) на вертикальной (V, *англ.* Vertical) и горизонтальной (H, *англ.* Horizontal) поляризации в широкой полосе обзора (1450 км). За сутки спутник совершает около 14 полных оборотов вокруг Земли. Данные уровня Level 1R (так называемые «витковые» данные (*англ.* swath)) обрабатываются и архивируются японским сервисом поддержки пользователей G-Portal (*англ.* Globe Portal System, <https://gportal.jaxa.jp/gpr/>). На момент написания статьи распространение данных свободное и бесплатное, без ограничений. Параметры солнечно-синхронной орбиты спутника GCOM-W1 обеспечивают высокое временное разрешение измерений в высоких широтах. В Мурманской области за сутки возможно получение 4–5 полей радиояркостной температуры уходящего микроволнового излучения (в зависимости от широты). На *рис. 1* для иллюстрации изменчивости измерений за сутки представлены поля поляризационной разности (*англ.* Polarization Difference — PD) в измерениях $T_{\text{я}}^{\text{V}}$ на частоте 89 ГГц: $\text{PD} = T_{\text{я}89}^{\text{V}} - T_{\text{я}89}^{\text{H}}$, где $T_{\text{я}89}^{\text{V}}$ и $T_{\text{я}89}^{\text{H}}$ — радиояркостная температура вертикально и горизонтально поляризованного излучения соответственно на частоте 89 ГГц. Поля PD над территорией Кольского полуострова на *рис. 1* иллюстрируют низкую поляризованность $T_{\text{я}}$ суши и высокую — морской воды и внутренних водоёмов и рек,

освободившихся к 1 июня ото льда. Анализ полей PD на *рис. 1* позволяет также сделать вывод о высокой изменчивости PD над морской водой в течение суток. Поскольку эта изменчивость диагностируется в течение суток, она связана с изменчивостью атмосферных параметров влажосодержания, а не возможной динамикой ледяных полей, для которой требуются большие промежутки времени.

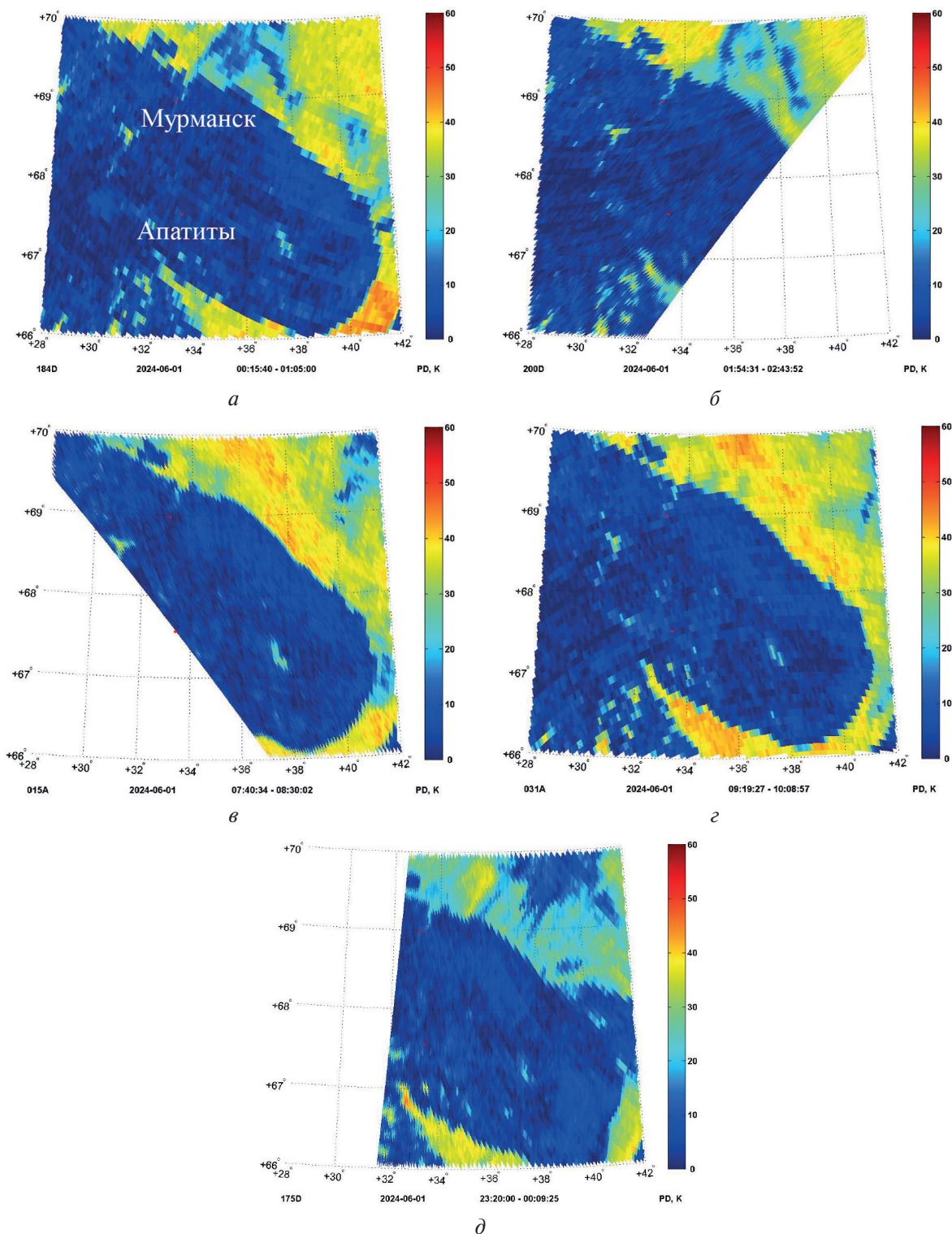


Рис. 1. Поля $PD = T_{Я89}^V - T_{Я89}^H$, измеренные радиометром AMSR2 над территорией Кольского полуострова 1 июня 2024 г.: *а* — 00:15–01:05; *б* — 01:54–02:43; *в* — 07:40–08:30; *г* — 09:19–10:08; *д* — 23:20–00:09 (2 июня 2024 г.). Время указано для начала и конца соответствующего витка

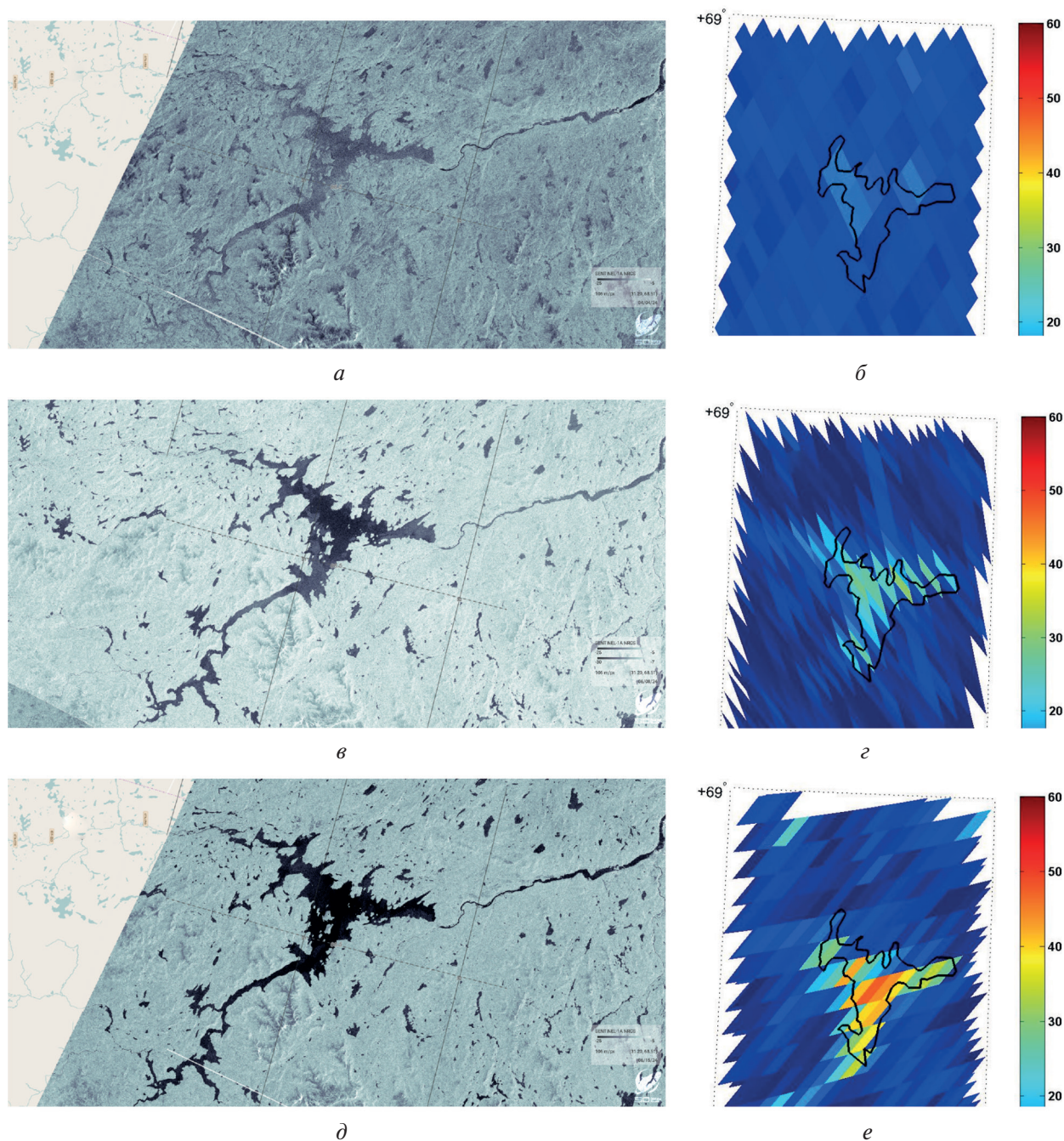


Рис. 2. Верхнетулумское водохранилище на снимках PCA Sentinel-1 (а, в, д) и в полях поляризованной разницы $PD = T_{\text{Я89}}^{\text{В}} - T_{\text{Я89}}^{\text{Г}}$, измеренных радиометром AMSR2 на частоте 89 ГГц (б, з, е): а — Sentinel-1 PCA, 4 апреля 2024 г.; б — AMSR2 PD, 4 апреля 2024 г.; в — Sentinel-1 PCA, 8 июня 2024 г.; з — AMSR2 PD, 8 июня 2024 г.; д — Sentinel-1 PCA, 15 июня 2024 г.; е — AMSR2 PD, 15 июня 2024 г.

Несмотря на то, что большинство исследований, посвящённых анализу PD над водой и над льдом, касаются морского льда и воды, основные различия микроволновых свойств льда и воды для диапазона частот вблизи 90 ГГц, обусловленные разницей в их диэлектрических свойствах, остаются справедливыми и для пресного льда и воды (Бордонский, Крылов, 1994; Хвостов и др., 2017). Изучение вариаций значений PD над водой ($PD_{\text{в}}$) и над пресным льдом ($PD_{\text{л}}$) представляет отдельный предмет исследования, поскольку на значения $PD_{\text{в}}$ влияют атмосферные условия (Заболотских и др., 2019), а на значения $PD_{\text{л}}$ — структурные образования различного масштаба на поверхности льда (Гурулев и др., 2023). Поэтому в настоящей работе мы провели анализ лишь временной серии измерений PD над областью

Верхнетуломского водохранилища для демонстрации возможности определения сроков начала и окончания ледостава и очищения ото льда.

Поскольку исследований характеристик микроволнового излучения (в частности, степени поляризованности) пресных озёр на частоте 89 ГГц очень мало, для верификации интерпретации значений PD для льда и для открытой воды использовались снимки радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) со спутника Sentinel-1. Иллюстрация примеров такой верификации представлена на рис. 2 (см. с. 169).

Рисунок 2 демонстрирует повышение значений PD, измеренных радиометром AMSR2 над территорией Верхнетуломского водохранилища, связанное с таянием льда: 4 апреля водохранилище полностью покрыто льдом, PD не превышает 15 К. Северная часть водохранилища 8 июня занята водой, PD составляет 23...27 К. К 15 июня водохранилище полностью освободилось ото льда, значения PD достигают 40...45 К. Несоответствие существенных градиентов полей PD нанесённым контурам водохранилища обусловлено попаданием областей суши в диаграмму направленности антенны AMSR2 и разной ориентацией антенны в зависимости от орбиты спутника.

Результаты

Для построения временных серий PD над Верхнетуломским водохранилищем (PD_{BB}) PD усреднялась в N пикселях в пределах границ водохранилища: $PD_{BB} = (\sum PD_i)/N$, $i = 1, \dots, N$. Данные о координатах пикселей (геопривязка измерений) предоставляются в спутниковых продуктах AMSR2 Level 1R вместе с информацией по радиояркостной температуре. В соответствии с геометрией сканирования значение N варьируется от 15 до 57. Полная серия значений PD_{BB} за период с 1 января 2020 по 9 июля 2024 г. (всего 5408 измерений) представлена на рис. 3.

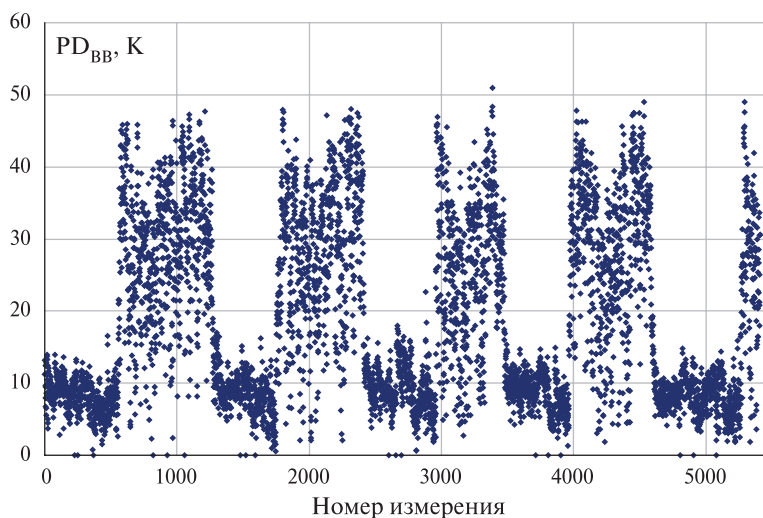


Рис. 3. Серия измерений над Верхнетуломским водохранилищем поляризаационной разницы (PD_{BB}) на частоте 89 ГГц радиометром AMSR2 с 1 января 2020 по 9 июля 2024 г.

Низкие значения PD_{BB} характерны для зимнего сезона (с декабря – января по май), высокие — для сезона открытой воды (с июня по ноябрь, а иногда и по декабрь). Средняя PD_{BB} над поверхностью водохранилища, покрытой льдом, рассчитанная за весь рассматриваемый период, составляет 9,1 К, а над открытой водной поверхностью — 27 К. Для зимнего сезона характерна существенно меньшая изменчивость PD_{BB} (среднеквадратичное отклонение σ) как в течение дня, так и в течение всего сезона (среднее σ за рассматриваемый период достигает 1,2 К), что связано с низкими значениями параметров влагосодержания сухой атмо-

сферы (влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков). В то же время изменчивость PD_{BB} в летний сезон приблизительно в четыре раза выше (среднее значение за рассматриваемый период составляет 4,4 К), что связано с сезонным увеличением параметров влагосодержания атмосферы. Среднемесячные значения PD_{BB} (PD_{BB}^{CM}) и изменчивость (σ^M) для рассмотренного периода наблюдений представлены на *рис. 4*.

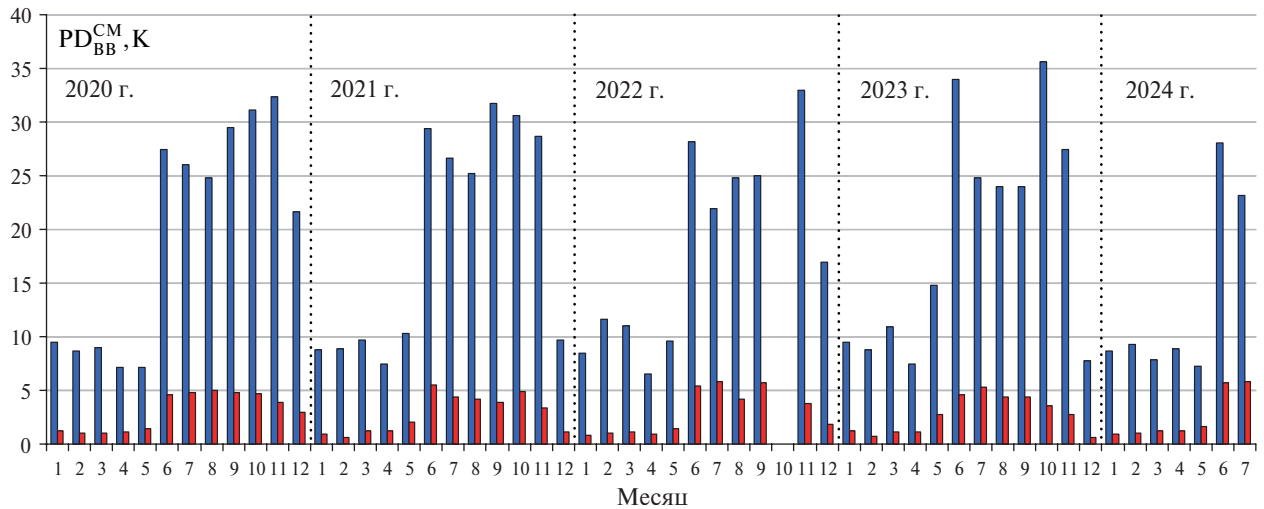


Рис. 4. Среднемесячная поляризационная разница над Верхнетуломским водохранилищем на 89 ГГц (PD_{BB}^{CM} , синие столбцы) и её изменчивость (σ^M , красные столбцы) для наблюдений с января 2020 по июль 2024 г. (с 26 сентября по 31 октября 2022 г. данные отсутствуют)

Для получения количественных характеристик PD_{BB} , а также определения сроков начала таяния льда на водохранилище, полного очищения ВВ ото льда, начала ледостава и полного замерзания ВВ был проведён анализ среднесуточных значений PD_{BB} (PD_{BB}^{CC}). Предварительно из общей серии измерений были убраны нефизичные значения ($PD_{BB} > 100$ К или $PD_{BB} < 0$). Значения PD_{BB}^{CC} за каждый день рассматриваемого периода по годам представлены на *рис. 5* (см. с. 172).

Для анализа PD_{BB}^{CC} использовался один из традиционных способов сглаживания временного ряда, при котором несистематические компоненты взаимно погашают друг друга, — метод скользящего среднего, применение которого особенно полезно для рядов с сезонными колебаниями. Размер временного интервала сглаживания («окна») подбирался экспериментально. Оптимальным размером окна, при котором наиболее чётко выражен переход от зимних значений PD_{BB}^{CC} к их летним значениям, оказался интервал в 10 дней. На *рис. 6* (см. с. 173) представлены усреднённые (сглаженные) с помощью окна в 10 дней значения PD_{BB}^{CC} ($PD_{BB\text{сгл}}^{CC}$, красные линии), производная функции $PD_{BB\text{сгл}}^{CC}$ по времени ($d_{\text{сгл}} PD_{BB\text{сгл}}^{CC}$, зелёные линии) и сглаженные значения производной ($d_{\text{сгл}} PD_{BB\text{сгл}}^{CC}$, чёрные линии).

Из *рис. 6* видно, что наблюдаемое в конце мая — начале июня (~150-й день года) повышение $PD_{BB\text{сгл}}^{CC}$ сопровождается ростом производной $d_{\text{сгл}} PD_{BB\text{сгл}}^{CC}$ до ~2–3 К, после которого следует падение $d_{\text{сгл}} PD_{BB\text{сгл}}^{CC}$ и её последующие колебания в течение всего летнего периода. Резкое возрастание поляризационной разницы излучения на 89 ГГц обусловлено увеличением площади открытой воды при вскрытии льда на водохранилище. После того как всё водохранилище освобождается ото льда, процессы испарения начинают вносить свой вклад в динамику параметров влагосодержания атмосферы. Увеличение влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков ведёт к повышению оптической толщины атмосферы и, соответственно, к уменьшению значений PD_{BB}^{CC} . Дальнейшие колебания PD_{BB}^{CC} в летний период связаны с изменчивостью атмосферных параметров, включая влагозапас атмосферы, водозапас и другие характеристики облачности, приводный ветер.

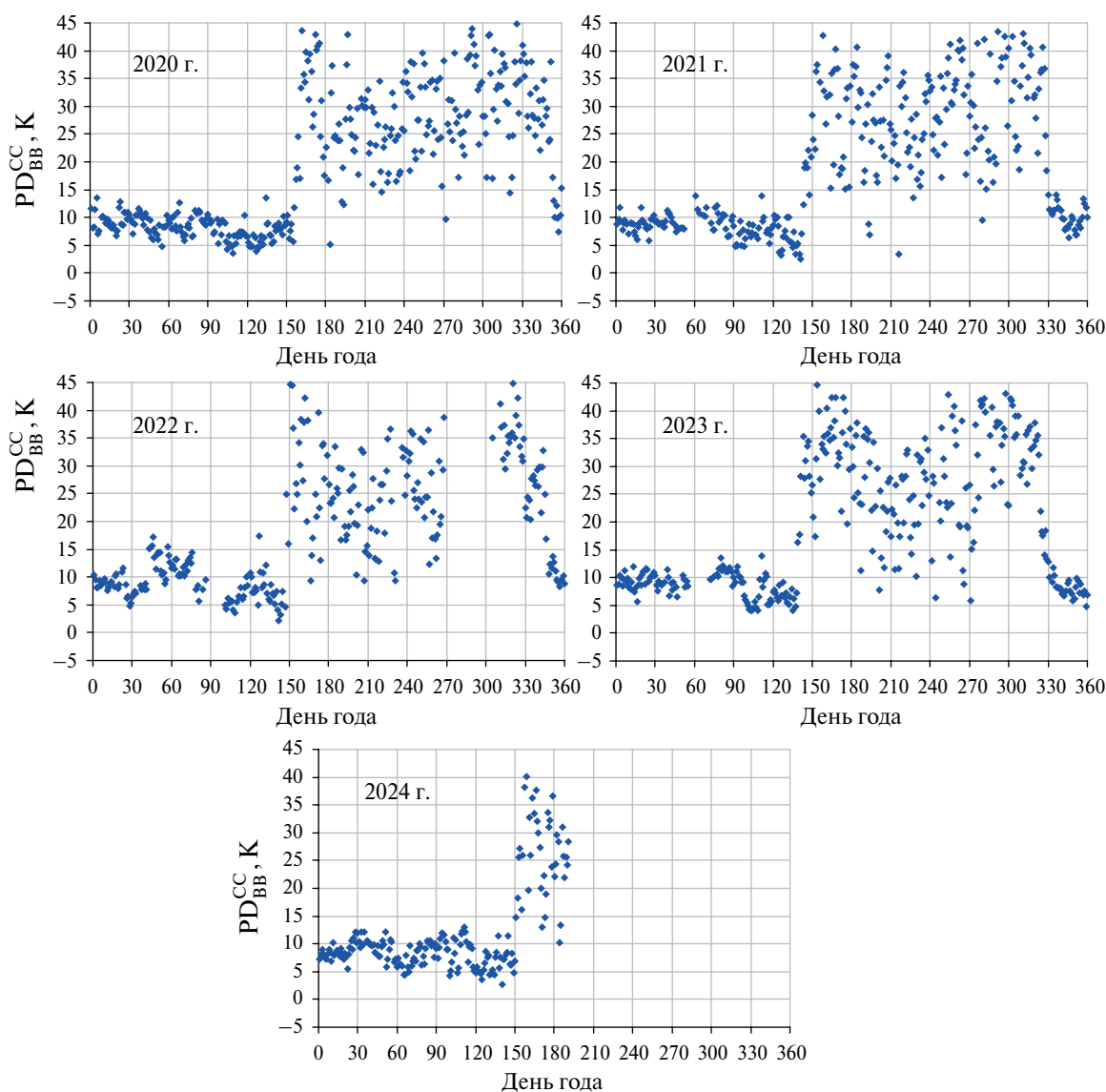


Рис. 5. Среднесуточная поляризационная разница измерений над Верхнетуломским водохранилищем PD_{BB}^{CC} (PD_{BB}^{CC}) на частоте 89 ГГц за каждый день рассматриваемого периода по годам. По оси абсцисс отложен номер дня в году

Наличие летних, а иногда и зимних, локальных экстремумов функции $d_{сгл} PD_{BB}^{CC}$ не позволяет обойтись при определении сроков начала таяния льда на водохранилище, полного очищения ВВ ото льда, начала ледостава на ВВ и его полного замерзания без визуального анализа ряда и априорной информации об этих сроках. В соответствии с этой априорной информацией, датой полного очищения ВВ ото льда можно считать день, соответствующий первому после зимы (в мае – июне) максимуму функции $d_{сгл} PD_{BB}^{CC}$, превышающему 2 К; датой начала таяния льда на водохранилище – первый день роста $d_{сгл} PD_{BB}^{CC}$ к этому максимуму, при котором $d_{сгл} PD_{BB}^{CC} > 0,5$ К; датой начала ледостава – день, соответствующий началу уменьшения $d_{сгл} PD_{BB}^{CC}$ к её последнему в году (в ноябре – декабре) минимуму, а датой окончания ледостава – возвращение $d_{сгл} PD_{BB}^{CC}$ к значениям, по модулю не превышающим 0,5 К.

Верификация предложенного метода проводилась для 2020–2022 гг. с помощью данных еженедельных отчётов гидрометслужбы о состоянии водных объектов в Мурманской области за 2020–2022 гг. По ним в 2020 г. 29 мая – 3 июня (150-й день) вскрылись небольшие озёра области и Верхнетуломское водохранилище. На 350-й день (15 декабря) большая часть ВВ

уже была покрыта льдом. В 2021 г. очищение ото льда началось раньше обычного — ледостав с промоинами наблюдался уже 20 мая (140-й день) и к 28–29 мая (148–149-й день) ВВ очистилось ото льда в пределах видимости. В 2022 г. ВВ вскрылось 27 мая (147-й день), а в середине декабря (345–350-й день) на водохранилище уже установился зимний режим с полным ледоставом. Эти данные полностью соответствуют информации, которую можно получить, анализируя временные ряды $d_{\text{сгл}} PD_{\text{ВВ сгл}}^{\text{CC}}$ (см. рис. 6).

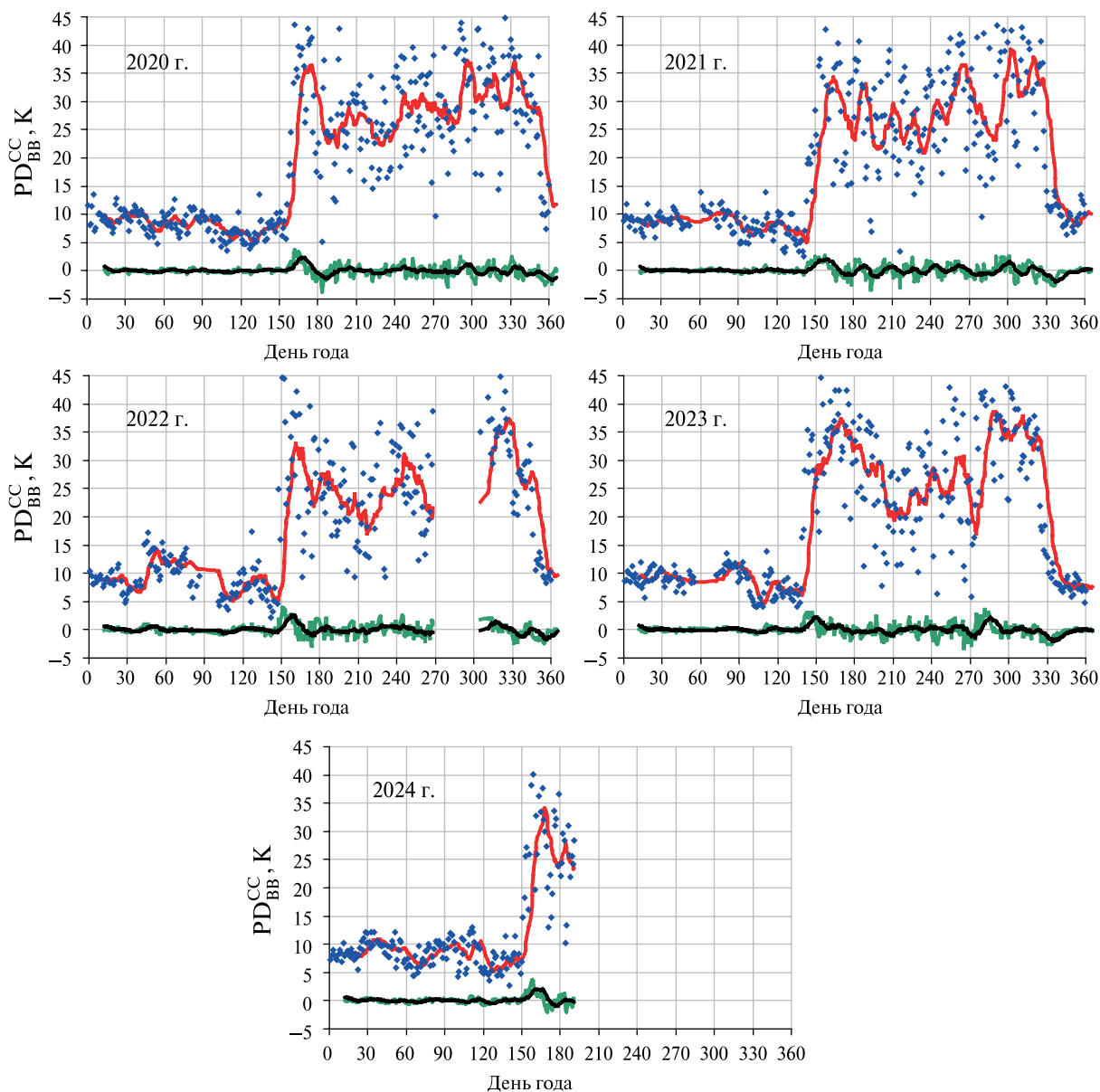


Рис. 6. Результаты обработки измерений поляризационной разницы измерений над Верхнетуломским водохранилищем на частоте 89 ГГц по годам. По осям абсцисс отложен номер дня в году

Для верификации предложенного метода с помощью спутниковых снимков рассмотрим ледостав на ВВ в 2023 г. День, соответствующий началу уменьшения $d_{\text{сгл}} PD_{\text{ВВ сгл}}^{\text{CC}}$ к её последнему в году минимуму, — 314-й (10 ноября); день возвращения к значениям, по модулю не превышающим 0,5 К, — 347-й (13 декабря). Имеющиеся снимки PCA Sentinel-1 за 4 ноября (рис. 7а, см. с. 174) и за 15 декабря (см. рис. 7б) позволяют уверенно утверждать, что 4 ноября 2023 г. на водохранилище не было льда (наблюдаются характерные проявления ветрового волнения), а 15 декабря оно было полностью покрыто льдом.

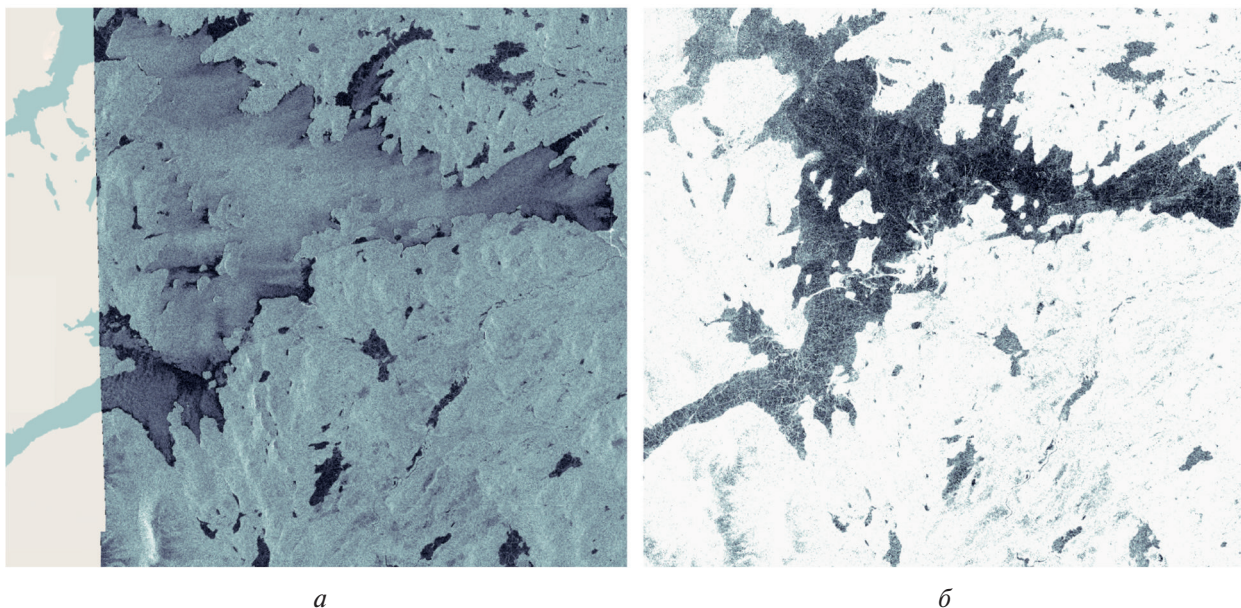


Рис. 7. Верхнетуломское водохранилище на снимках PCA Sentinel-1:
а — 4 ноября 2023 г.; б — 15 декабря 2023 г.

Аналогично, в соответствии с предложенной методикой, день начала таяния льда на водохранилище в 2023 г. — 135-й (15 мая), а полного очищения ото льда — 150-й (30 мая). Ещё более определённой могла бы быть интерпретация снимков видимого диапазона в безоблачных условиях, позволяющих уверенно разделять области, покрытые льдом и свободные от него. К сожалению, для рассматриваемого периода не удалось найти таких изображений; микроволновые измерения в такой ситуации являются единственным источником информации о состоянии поверхности.

Заключение

В работе на примере Верхнетуломского водохранилища Мурманской области продемонстрирована возможность использования данных спутниковых микроволновых радиометров, обладающих каналами поляризационных измерений на частоте ~ 90 ГГц, для определения дат замерзания и очищения ото льда внутренних водоёмов с масштабами, превышающими 100 км^2 . Проанализированы измерения спутникового радиометра AMSR2 поляризационной разницы (PD) радиояркостной температуры микроволнового излучения над водохранилищем за период январь 2020 — июль 2024 г. Показано, что в зимний период (декабрь — май), когда водохранилище покрыто льдом, среднее значение PD над поверхностью водохранилища составляет 9,1 К, а изменчивость PD достигает 1,2 К. В летний период (июнь — ноябрь) над открытой водной поверхностью средняя PD равна 27 К, а изменчивость составляет 4,4 К, что обусловлено сравнительно более высокими и изменчивыми атмосферными параметрами (влажностью атмосферы, водозапасом и другими характеристиками облаков, скоростью приводного ветра). Эти различия лежат в основе предложенной методики полуавтоматического определения сроков начала таяния льда на водохранилище, полного его очищения ото льда, начала ледостава и полного замерзания. Данный метод использует априорную информацию об этих сроках и сглаженную с помощью скользящего среднего с окном в 10 дней функцию производной временного ряда PD. Первичная проверка работоспособности методики проведена с помощью сопоставления результатов её применения как со снимками PCA Sentinel-1, так и с отчётами гидрометслужбы о состоянии водных объектов в Мурманской области. Более полная верификация требует более регулярных снимков PCA, и, возможно, будет проведена при обеспечении доступности данных российского PCA «Кондор-ФКА».

При безоблачной погоде для верификации могут быть использованы снимки спектральных радиометров в оптическом диапазоне, в том числе с российских космических систем «Ресурс-П», «Канопус-В» и «Метеор-М».

Применение данных дистанционного зондирования позволяет получать пространственно распределённую картину состояния льда на водохранилище для обеспечения Мурманского УГМС информацией о ледовых явлениях на водохранилище. Такое обеспечение является насущной необходимостью и существенно менее затратной и более точной альтернативой использованию данных ГМС.

Исследования, представленные в данной статье, выполнены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-17-20021, <https://rscf.ru/project/24-17-20021/>.

Литература

1. *Бордонский Г. С., Крылов С. Д.* Мониторинг состояния озёр по радиотепловому излучению ледяного покрова // География и природные ресурсы. 1994. № 1. С. 170–175.
2. *Георгиевский Ю. М.* Краткосрочные и долгосрочные прогнозы ледовых явлений на реках, озёрах и водохранилищах. Л.: Изд-во ЛГМИ, 1986. 50 с.
3. *Георгиевский Ю. М., Шаночкин С. В.* Гидрологические прогнозы. СПб: Изд-во РГГМУ, 2007. 436 с.
4. *Гурулев А. А., Орлов А. О., Цыренжапов С. В. и др.* Выявление областей торошения пресного ледяного покрова по собственному тепловому излучению // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 1. С. 219–228. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-219-228.
5. *Заболотских Е. В., Балашова Е. А., Шапрон Б.* Усовершенствованный метод восстановления сплошности морского льда по данным спутниковых микроволновых измерений вблизи 90 ГГц // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 233–243. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-233-243.
6. *Калинин В. Г., Калинин Н. В.* Анализ корреляционных зависимостей сроков ледообразования от основных факторов на реках водосбора Воткинского водохранилища // Геогр. вестн. 2013. Т. 26. № 3. С. 32–37.
7. *Попов Е. Г.* Основы гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 296 с.
8. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 1. Кольский полуостров / под ред. Ю. А. Елшина. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 134 с.
9. *Сутырина Е. Н.* (2014а) Изучение внутренних водоёмов и водосборов с применением данных дистанционного зондирования Земли. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. 133 с.
10. *Сутырина Е. Н.* (2014б) Применение материалов дистанционного зондирования для изучения особенностей разрушения снежно-ледяного покрова на озере Байкал и озере Хубсугул // Ученые записки Российского гос. гидрометеорол. ун-та. 2014. № 34. С. 85–92.
11. *Сутырина Е. Н.* Методики долгосрочного прогнозирования сроков полного очищения ото льда водохранилищ Ангаро-Енисейского каскада // Геогр. вестн. 2017. Т. 40. № 1. С. 66–72. DOI: 10.17072/2079-7877-2017-1-66-72.
12. *Хвостов И. В., Романов А. Н., Тихонов В. В., Шарков Е. А.* Некоторые особенности микроволнового радиотеплового излучения пресноводных водоёмов с ледовым покровом // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 149–154. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-149-154.
13. *Chan M. A., Comiso J. C.* Arctic cloud characteristics as derived from MODIS, CALIPSO, and CloudSat // J. Climate. 2012. V. 26. No. 10. P. 3285–3306. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00204.1.
14. *Comiso J. C., Cavalieri D. J., Markus T.* Sea ice concentration, ice temperature, and snow depth using AMSR-E data // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2003. V. 41. No. 2. P. 243–252. DOI: 10.1109/TGRS.2002.808317.
15. *Drüe C., Heinemann G.* High-resolution maps of the sea-ice concentration from MODIS satellite data // Geophysical Research Letters. 2004. V. 31. No. 20. Article L20403. DOI: 10.1029/2004GL020808.
16. *Grenfell T. C., Barber D. G., Fung A. K. et al.* Evolution of electromagnetic signatures of sea ice from initial formation to the establishment of thick first-year ice // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1998. V. 36. No. 5. P. 1642–1654. DOI: 10.1109/36.718636.
17. *Imaoka K., Kachi M., Kasahara M. et al.* Instrument performance and calibration of AMSR-E and AMSR2 // Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. 2010. V. 38. Pt. 8. P. 13–16.

18. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels // J. Geophysical Research: Oceans. 2008. V. 113. No. C2. Article C02S03. DOI: 10.1029/2005JC003384.
19. Tian-Kunze X., Kaleschke L., Maaß N. et al. SMOS-derived thin sea ice thickness: algorithm baseline, product specifications and initial verification // Cryosphere. 2014. V. 8. No. 3. P. 997–1018. DOI: 10.5194/tc-8-997-2014.

Exploring satellite microwave radiometer data to determine the dates of freezing and melting for inland water bodies using as an example Verkhnetulomskoye Reservoir in Murmansk Region

E. V. Zabolotskikh^{1,2}, K. I. Yarusov¹, I. M. Lazareva², O. I. Lyash², G. S. Shelegov^{3,2}

¹ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg 192007, Russia
E-mail: liza@rshu.ru

² Murmansk Arctic University, Murmansk 183038, Russia

³ EMERCOM Main Office for Murmansk Region, Murmansk 183053, Russia

The paper proposes a method for determination of the dates of freezing and melting of inland water bodies based on polarization measurements of satellite microwave radiometers at a frequency of ~90 GHz. Using the Verkhnetulomskoye Reservoir in Murmansk Region as an example and measurements of the Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2) satellite microwave radiometer, it is shown that analysis of time series of the AMSR2 polarization measurements at a frequency of 89 GHz makes it possible to determine the dates of ice melting and ice freezing start and finish for reservoirs with scales exceeding 100 km². The AMSR2 measurements of the polarization difference (PD) of brightness temperatures of microwave radiation over the reservoir were analyzed for the period of January 2020–July 2024. The results of the PD analysis have shown that the PD average values and variability in winter (December–May) are approximately 3 times lower than in summer (June–November). These differences, together with a priori information on ice phenomena, have allowed to propose a method for semi-automatic determination of ice melting and ice freezing start and finish dates for the reservoir. The functionality of the method has been tested using hydrometeorological service reports on the state of water bodies in Murmansk Region and Sentinel-1 SAR images. The use of remote sensing data procures compilation of a spatially distributed map of ice condition at the reservoir to provide Murmansk hydrometeorological services information on ice phenomena at the reservoir. It is a significantly less expensive and more accurate alternative to using hydrometeorological station data.

Keywords: satellite data, ice of inland water bodies, Murmansk Region, time series, AMSR 2

Accepted: 18.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-165-177

References

1. Bordonsky G. S., Krylov S. D., Monitoring the state of lakes by radio emission of ice cover, *Geografiya i prirodnye resursy*, 1994, No. 1, pp. 170–175 (in Russian).
2. Georgievsky Yu. M., *Kratkosrochnye i dolgosrochnye prognozy ledovykh yavlenii na rekakh, ozerakh i vodo-khranilishchakh* (Short-term and long-term forecasts of ice phenomena on rivers, lakes and reservoirs), Leningrad: Izd. LGMI, 1986, 50 p. (in Russian).
3. Georgievsky Yu. M., Shanochkin S. V., *Gidrologicheskie prognozy* (Hydrological forecasts), Saint Petersburg: RGGMU, 2007, 436 p. (in Russian).
4. Gurulev A. A., Orlov A. O., Tsyrenzhapov S. V. et al., Identification of areas of hummocking of freshwater ice cover by its own thermal radiation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 1, pp. 219–228 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-219-228.

5. Zabolotskikh E. V., Balashova E. A., Chapron B., Advanced method for sea ice concentration retrieval from satellite microwave radiometer measurements at frequencies near 90 GHz, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 4, pp. 233–243 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-233-243.
6. Kalinin V. G., Kalinin N. V., Analysis of correlation dependencies of ice formation terms from main factors on rivers of the basin of Votkinsky water storage reservoir, *Geograficheskii vestnik*, 2013, V. 26, No. 3, pp. 32–37 (in Russian).
7. Popov E. G., *Osnovy gidrologicheskikh prognozov* (The basis of hydrological forecasts), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968, 296 p. (in Russian).
8. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR: Gidrologicheskaya izuchennost'. T. 1. Kol'sky poluostrov* (Surface water resources of the USSR: Hydrological study. V. 1. Kola Peninsula), Yu. A. Elshin (ed.), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1969, 134 p. (in Russian).
9. Sutyryna E. N. (2014a), *Izuchenie vnutrennikh vodoemov i vodosborov s primeneniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Study of inland water bodies and catchments using Earth remote sensing data), Irkutsk: IGU, 2014, 133 p. (in Russian).
10. Sutyryna E. N. (2014b), Application of the remote sensing data to the study of the features of the destruction of snow and ice cover of Lake Baikal and Lake Hovsgol, *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2014, No. 34, pp. 85–92 (in Russian).
11. Sutyryna E. N., Methods of long-term forecasting of the dates of complete ice melting for the reservoirs of the Angara-Yenisei cascade, *Geograficheskii vestnik*, 2017, V. 40, No. 1, pp. 66–72 (in Russian), DOI: 10.17072/2079-7877-2017-1-66-72.
12. Khvostov I. V., Romanov A. N., Tikhonov V. V., Sharkov E. A., Some features of L-band thermal radiation of freshwater bodies with ice cover, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, V. 14, No. 4, pp. 149–154 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-149-154.
13. Chan M. A., Comiso J. C., Arctic cloud characteristics as derived from MODIS, CALIPSO, and CloudSat, *J. Climate*, 2012, V. 26, No. 10, pp. 3285–3306, DOI: 0.1175/JCLI-D-12-00204.1.
14. Comiso J. C., Cavalieri D. J., Markus T., Sea ice concentration, ice temperature, and snow depth using AMSR-E data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2003, V. 41, No. 2, pp. 243–252, DOI: 10.1109/TGRS.2002.808317.
15. Drüe C., Heinemann G., High-resolution maps of the sea-ice concentration from MODIS satellite data, *Geophysical Research Letters*, 2004, V. 31, No. 20, Article L20403, DOI: 10.1029/2004GL020808.
16. Grenfell T. C., Barber D. G., Fung A. K. et al., Evolution of electromagnetic signatures of sea ice from initial formation to the establishment of thick first-year ice, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1998, V. 36, No. 5, pp. 1642–1654, DOI: 10.1109/36.718636.
17. Imaoka K., Kachi M., Kasahara M. et al., Instrument performance and calibration of AMSR-E and AMSR2, *Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, 2010, V. 38, Pt. 8, pp. 13–16.
18. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G., Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2008, V. 113, No. C2, Article C02S03, DOI: 10.1029/2005JC003384.
19. Tian-Kunze X., Kaleschke L., Maaß N. et al., SMOS-derived thin sea ice thickness: algorithm baseline, product specifications and initial verification, *Cryosphere*, 2014, V. 8, pp. 997–1018, DOI: 10.5194/tc-8-997-2014.