

Повышение информативности среднесуточных полей измерений спутниковых микроволновых радиометров

Е. В. Заболотских, Д. Е. Яковлев, Е. В. Львова, М. Д. Кудель, К. И. Ярусов

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

Данные спутниковых микроволновых радиометров обеспечивают глобальный мониторинг параметров атмосферы и подстилающей поверхности независимо от облачности и солнечного освещения. Однако низкое пространственное разрешение измерений радиояркостной температуры T_B на низкочастотных каналах ограничивает их применение. В работе дан краткий обзор существующих методов повышения пространственного разрешения микроволновых измерений. Также рассмотрен метод улучшения чёткости и информативности полей среднесуточных измерений радиометра AMSR2 (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) на каналах С-диапазона для региона Арктики. Суть метода заключается в использовании перед усреднением данных регулярной координатной сетки с разрешением 1×1 км и пересчёте исходных данных T_B первого уровня обработки на новую сетку методом билинейной интерполяции. Данный метод позволяет сохранить в среднесуточных данных максимум информации от всех измерений за сутки и избежать избыточного сглаживания данных, неизбежного при использовании традиционных подходов. В результате информативность данных, а с ней и чёткость полей T_B повышается за счёт высокого временного разрешения радиометрических измерений в высоких широтах. Приведены примеры увеличения чёткости полей T_B на частоте 6,9 ГГц по сравнению со стандартным продуктом Японского агентства аэрокосмических исследований. Данный подход может быть использован для изучения свойств подстилающей поверхности на основании анализа измерений AMSR2 на частоте 6,9 ГГц. Перспективным представляется применение подхода для восстановления сплочённости морского льда по данным измерений на каналах 6,9 ГГц, на которых минимальны как влияние атмосферы, так и изменчивость излучения льда и воды.

Ключевые слова: Арктика, AMSR2, поля радиояркостной температуры, пространственное разрешение, среднесуточные данные

Одобрена к печати: 05.03.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-3-59-73

Существующие методы повышения пространственного разрешения микроволновых измерений

Измерения спутниковых микроволновых радиометров обеспечивают глобальный мониторинг параметров атмосферы и подстилающей поверхности независимо от облачности и солнечного освещения. Благодаря картированию большого количества геофизических параметров на непрерывной и регулярной основе стали возможны построение долговременных рядов параметров и оценка климатических изменений за последние полвека (Serreze et al., 2025). Спутниковые микроволновые радиометры представляют собой многочастотные и мультиполяризационные инструменты, регистрирующие собственное излучение системы «подстилающая поверхность — атмосфера» на нескольких частотах и поляризациях. Их измерения позволяют получать глобальные данные по влагозапасу атмосферы (Zabolotskikh et al., 2020) и водозапасу облаков (Заболотских, 2025; Greenwald et al., 1993), температуре поверхности (Wentz et al., 2000), сплочённости морского льда (Comiso, 2009), водозапасе снежного покрова (Xing et al., 2022) и влажности почвы (Lu et al., 2024). Поля параметров, восстанавливаемых по радиометрическим измерениям, отличаются низким — от десятков до сотен квадратных километров — пространственным разрешением (Lenti et al., 2013; Long et al., 2019; Sethmann et al., 1994). Низкое пространственное разрешение микроволновых снимков ограничивает их применение. Исследования последних лет, направленные на улучшение

пространственного разрешения и информативности микроволновых данных, могут повысить точность прогнозов погоды и климата (Maeda et al., 2021; Nunziata et al., 2021).

Для улучшения пространственного разрешения микроволновых измерений применяются подходы, которые условно можно разделить на две большие группы. Первая группа включает методы, требующие использования дополнительных данных более высокого разрешения, — методы слияния данных (*англ.* data fusion algorithms) (Choi, Hur, 2012). Эти методы используются чаще всего для улучшения качества оптических снимков, а не полей микроволновых измерений. Однако, например, в работе (Заболотских, Шапрон, 2025) на основании физического моделирования радиояркостной температуры микроволнового излучения T_B обосновывается возможность улучшения пространственного разрешения данных японского спутникового радиометра AMSR2 (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) на каналах С-диапазона с помощью измерений на частоте 36,5 ГГц для изучения параметров подстилающей поверхности морей Арктики. К этой же группе можно отнести методы машинного обучения, настроенные на сопутствующих данных высокого разрешения (Hu et al., 2022; Li et al., 2019). Вторая группа методов не требует дополнительных данных другого спектрального диапазона, а для повышения пространственного разрешения использует информацию, получаемую из областей перекрытия диаграмм направленности антенны (Long et al., 1993; Sethmann et al., 1994), — алгоритмы инверсии (*англ.* antenna pattern inversion algorithms).

Обработка спутниковых микроволновых измерений при создании массивов данных первого уровня (*англ.* Level 1) проводится посредством дискретизации функции диаграммы направленности антенны G_i . Измерения представляют собой пространственно отфильтрованные данные, дискретизированные на двумерной (2D) сетке (Early, Long, 2001), которые могут быть представлены в интегральной форме как:

$$T_A(i) = \overline{G_i}^{-1} \iint G_i(x, y) T_B(x, y) dx dy,$$

где $T_A(i)$ — i -е измерение антенны; $T_B(x, y)$ — эффективная радиояркостная температура системы подстилающая поверхность — атмосфера в точке (x, y) ; $G_i(x, y)$ — вес излучения элемента поверхности (x, y) в формировании i -го измерения, определяемый формой диаграммы направленности антенны:

$$\overline{G_i} = \iint G_i(x, y) dx dy.$$

Дискретность записи сигнала приводит к тому, что размер пикселей, обусловленный частотой записи сигнала, может оказаться меньше пространственного разрешения измерений. Например, измерения радиометра AMSR2 имеют разрешение от 3 до 62 км в зависимости от частоты, а размер пикселей составляет ~10 км (Imaoka et al., 2012). При перекрытии соседних элементов пространственного разрешения и известных характеристиках G_i алгоритмы инверсии диаграммы направленности могут обеспечить получение микроволновых изображений с улучшенным разрешением за счёт передискретизации исходных данных (Lindsley, Long, 2015). При отсутствии передискретизации (например, для каналов измерений на частотах около 90 ГГц) улучшение разрешения с помощью таких алгоритмов невозможно.

Основные методы повышения пространственного разрешения при наличии передискретизации измерений включают алгоритм BG (*англ.* Backus–Gilbert) (Backus, Gilbert, 1967; Stogryn, 1978) и алгоритм реконструкции скаттерометрических изображений SIR (*англ.* Scatterometer Image Reconstruction) (Long, Daum, 1998). Алгоритм BG успешно применялся при обработке данных таких инструментов, как AMSR-E (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer EOS), SSM/I (*англ.* Special Sensor Microwave/Imager) и SSMIS (*англ.* Special Sensor Microwave Imager/Sounder) (Early, Long, 2001; Gu, England, 2007; Long, Daum, 1998; Poe, 1990). Он также используется японским космическим агентством JAXA (*англ.* Japan Aerospace Exploration Agency) при создании продукта Level 1R (R — *англ.* resampled), который представляет собой калиброванную T_B на различных каналах радиометра с приведённым одинаковым пространственным разрешением для разных каналов (Descriptions..., 2013).

Алгоритм SIR, первоначально разработанный для реконструкции изображений скаттерометров (Long et al., 1993), позже был применён к радиометрическим данным (Long, Daum,

1998). Так же как и алгоритм BG, SIR требует явного задания функций $G_i(i)$. В настоящее время алгоритм SIR успешно используется для создания спутниковых продуктов Level 1 для радиометров SMAP (*англ.* Soil Moisture Active Passive), а соответствующие продукты, охватывающие период 1995–2022 гг., доступны для решения научных и климатических задач (Long et al., 2023).

Несмотря на привлекательность возможности повышения пространственного разрешения радиометрических измерений применением алгоритмов BG и SIR, их практическая реализация невозможна без задания функций диаграмм направленности и достаточно громоздких расчётов (Bai et al., 2025). Кроме громоздкости вычислений, существует ещё проблема усиления шума в восстанавливаемом сигнале (Bai et al., 2025; Stogryn, 1978). При применении алгоритмов усиление шума может привести к обратному эффекту, а именно к размытию изображения (поля T_B) за счёт многократно увеличившихся шумов. Расчёты с использованием теории Бакуса – Гилберта (*англ.* Backus–Gilbert method) показали, для каждого уровня шума существует своё наилучшее пространственное разрешение, повысить которое возможно лишь изменив этот уровень (Stogryn, 1978).

Эти проблемы обуславливают отсутствие на сегодняшний день спутниковых радиометрических продуктов Level 1 повышенного пространственного разрешения (кроме продуктов SMAP) в международных центрах обработки и хранения данных. Американский центр данных по снегу и льду NSIDC (*англ.* National Snow and Ice Data Center) анонсировал создание гибридного спутникового продукта по T_B , вычисляемого посредством применения алгоритма SIR к данным радиометров SMMR (*англ.* Scanning Multichannel Microwave Radiometer), SSM/I, SSMIS, AMSR-E и AMSR2 на сетке EASE-Grid 2.0 с разрешением 3,125 км. Однако на момент написания статьи данные на каналах 6,9 и 10,65 ГГц не рассчитываются (Brodzik et al., 2024) (см. также <https://nsidc.org/data/nsidc-0630/versions/2>, доступ для России ограничен). Что касается стандартных доступных продуктов по T_B более высоких уровней, полученных постобработкой данных Level 1 (для данных JAXA это продукты Level 3 — среднесуточные и среднемесячные значения T_B , то они вычисляются, как правило, на регулярных сетках либо простым усреднением данных по технологии GRD (*англ.* gridding), либо с помощью усреднения после предварительной интерполяции исходных данных. Суть метода GRD заключается в том, что все измерения в течение указанного периода времени, центры которых попадают в границы конкретной ячейки сетки, усредняются. Невзвешенное среднее значение становится значением T_B для данной ячейки. Именно так создаются среднесуточные продукты по T_B в NSIDC (<https://nsidc.org/data/nsidc-0802/versions/2>). Продукты JAXA используют при усреднении ближайшие в радиусе 8 км значения T_B (https://www.eorc.jaxa.jp/AMSR/datacatalog/index_en.html#processing_level).

В настоящей работе мы предлагаем модификацию метода получения среднесуточных значений T_B для повышения информативности и чёткости результирующих полей измерений радиометра AMSR2 на каналах на частоте 6,9 ГГц для региона Арктики с целью использования этих измерений для изучения свойств подстилающей поверхности. Суть метода заключается в повышении качества полей среднесуточных измерений за счёт высокого временного разрешения в высоких широтах.

Описание подхода

Японский микроволновый радиометр AMSR2 на спутнике GCOM-W1 (*англ.* Global Change Observation Mission 1st-Water) регистрирует линейно поляризованное собственное излучение системы подстилающая поверхность — атмосфера на семи частотах от 6,9 до 89 ГГц на вертикальной (V, *англ.* vertical) и горизонтальной (H, *англ.* horizontal) поляризации с размером пикселей ~10 км и эффективным пространственным разрешением от 3×5 км (на 89 ГГц) до 35×62 км (на 6,9 ГГц). Особенности антенной системы на разных частотах приводят к тому, что положение центров элементов разрешения для разных каналов разное с расстоянием между ними в пределах 2 км. Начиная с 2016 г. агентство JAXA рассчитывает стандартный продукт по T_B Level 1R, в котором калиброванные измерения T_B на разных каналах

относятся к элементам разрешения с одним и тем же центром координат. Кроме того, T_B для одних и тех же каналов измерений вычисляется для разных элементов пространственного разрешения, соответствующего разрешению всех более низкочастотных каналов. Например, T_B на каналах 89 ГГц в продукте Level 1R идёт как с оригинальным разрешением, так и — дополнительно — с разрешением каналов на 36,5; 23,8; 10,65 и 6,9 ГГц. Создание такого продукта основано на теории Бакуса—Гилберта для вычисления весовых коэффициентов с целью получения скорректированных (искусственных) диаграмм направленности, применение которых позволяет привести в соответствие T_B от одного и того же элемента разрешения на разных частотах. В этой связи использование любого из алгоритмов инверсии диаграммы направленности, основанного на знании антенных функций или на предположении об их виде (Bai et al., 2025), становится ещё более проблематичным.

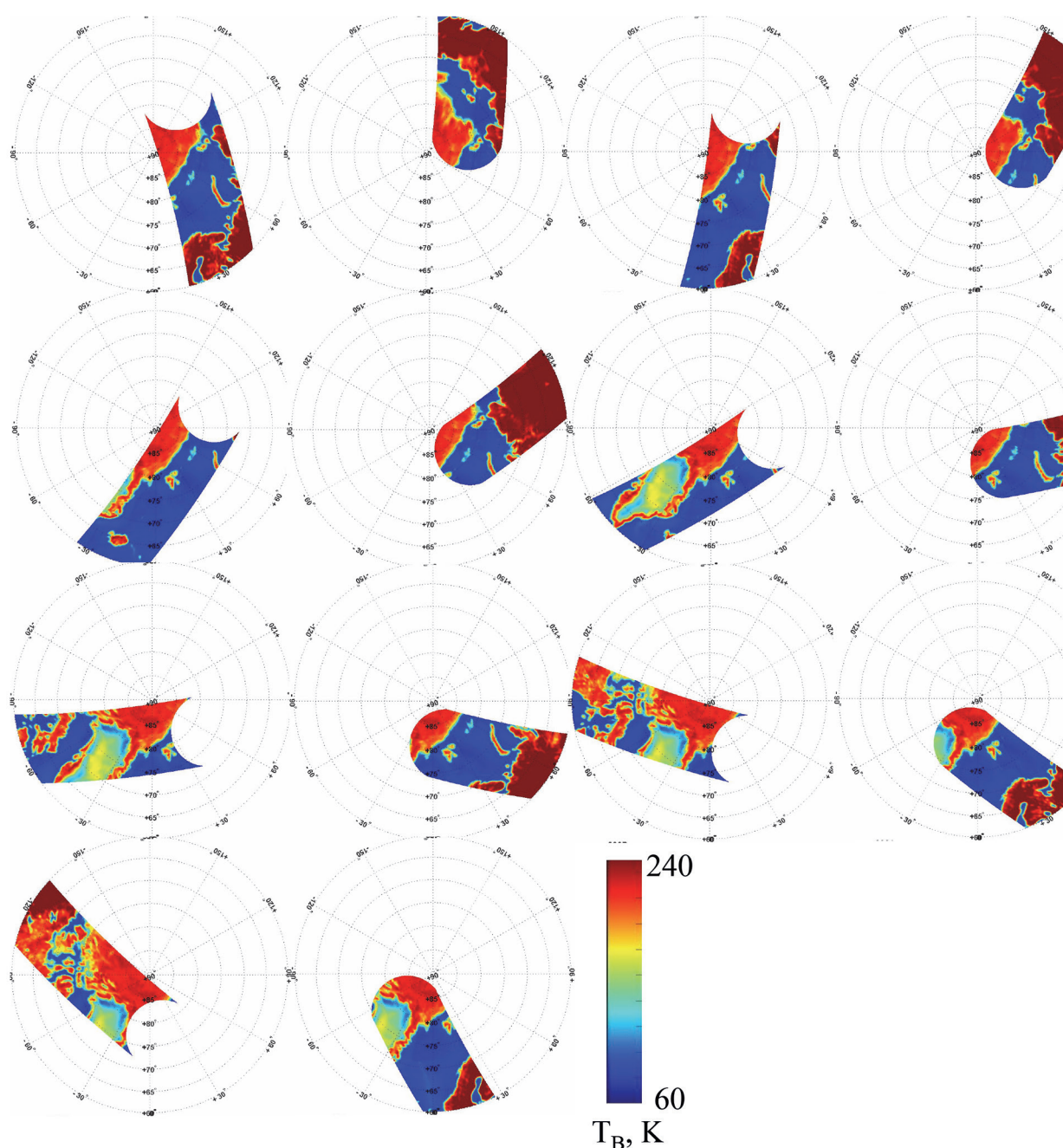


Рис. 1. Поля T_B на частоте 6,9 ГГц на горизонтальной поляризации в Арктике за первую половину дня 25 октября 2025 г. Продукт JAXA AMSR2 Level 1R

Тем не менее для полярных областей при создании среднесуточных продуктов по T_B возможно если не повышение пространственного разрешения, то улучшение качества полей T_B и их информативности за счёт высокого временного разрешения измерений.

Рисунок 1 (см. с. 62) иллюстрирует поля измерений AMSR2 T_B продукта Level 1R на частоте 6,9 ГГц на горизонтальной поляризации в Арктике за первую половину дня 25 октября 2025 г. Солнечно-синхронная орбита спутника GCOM-W1 и геометрия сканирования радиометра обеспечивают 28–29 восходящих и нисходящих полувитков измерений в полосе обзора 1400 км. Поскольку измерения на 6,9 ГГц обладают самым низким из всех имеющихся каналов пространственным разрешением, в продукте Level 1R они представлены одной парой данных — на горизонтальной и вертикальной поляризации.

Среднесуточный продукт JAXA по AMSR2 T_B (Level 3) создаётся из данных Level 1R по технологии GRD для Арктики на полярной регулярной 10-км сетке PS (англ. Polar Stereographic), размерностью 760 (по широте) × 1120 (по долготе) пикселей отдельно для восходящих и нисходящих орбит (два массива данных за сутки). Значения T_B Level 3 вычисляются простым усреднением всех значений T_B продукта Level 1R, центры элементов разрешения которых оказались ближайшими от центра элемента регулярной сетки PS. Для исключения удалённых измерений радиус поиска ближайшего измерения ограничивается 8 км. Результаты усреднения двух массивов данных AMSR2 Level 3 за сутки в виде полей среднесуточных значений T_B на 6,9 ГГц показаны на рис. 2.

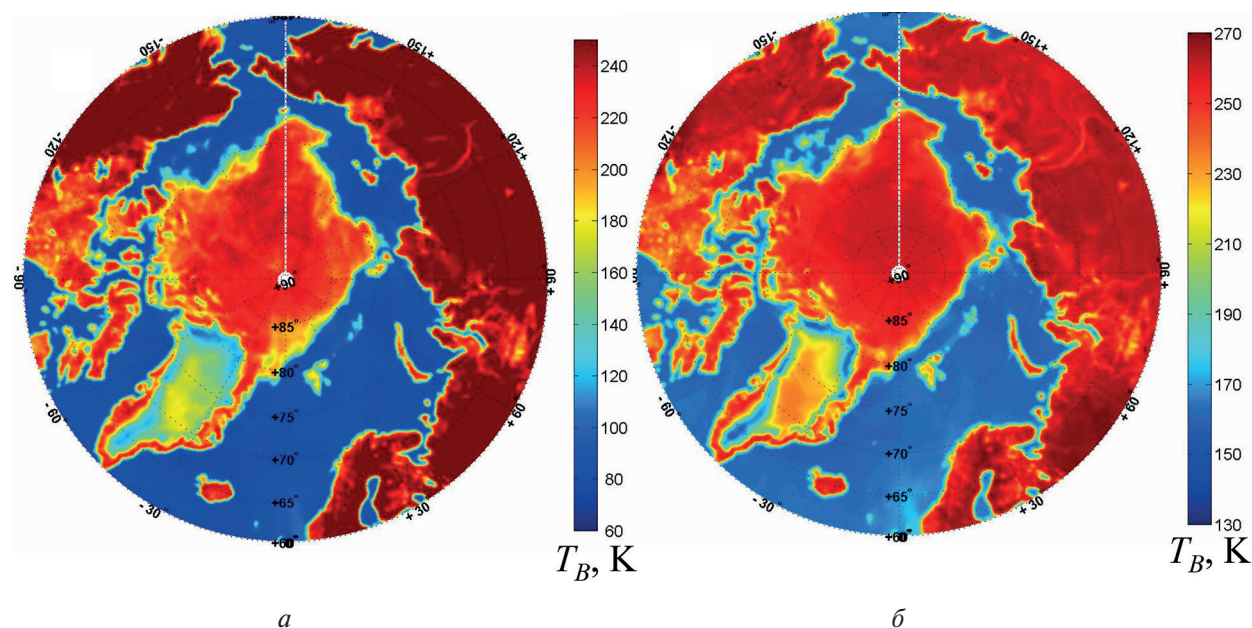


Рис. 2. Поля среднесуточных значений T_B радиометра AMSR2 в Арктике на частоте 6,9 ГГц за 25 октября 2025 г.: а — Н-поляризация; б — V-поляризация. Продукт JAXA AMSR2 Level 3

Количество измерений AMSR2 за сутки над одним и тем же элементом поверхности в полярных областях для широты выше 70° с. ш. составляет от 3 до 9 (рис. 3, см. с. 64).

Для примера рис. 4 (см. с. 64) иллюстрирует расположение центров элементов нерегулярной оригинальной сетки продукта Level 1R для всех измерений за сутки, попадающих в область 1 на рис. 3. Восемь карт центров элементов сетки соответствуют восьми файлам данных, а номер вверху карты соответствует номеру витка в системе нумерации файлов JAXA. При подсчёте количества измерений необходимо учитывать, что файлы с данными последовательных измерений содержат небольшое количество (60 строк) информации, дублирующей информацию из предыдущего файла.

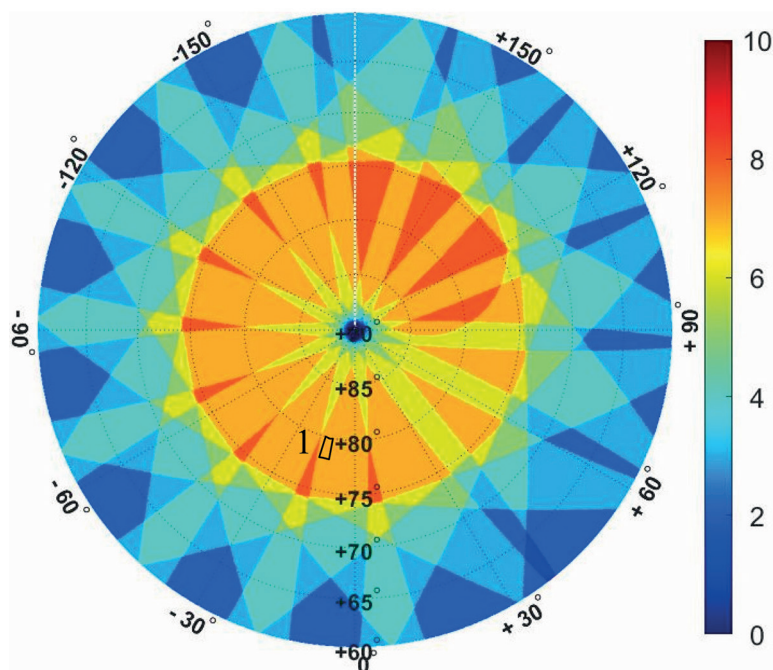


Рис. 3. Количество измерений T_B радиометром AMSR2 в Арктике, рассчитанное по данным Level 1R за 5 августа 2022 г.

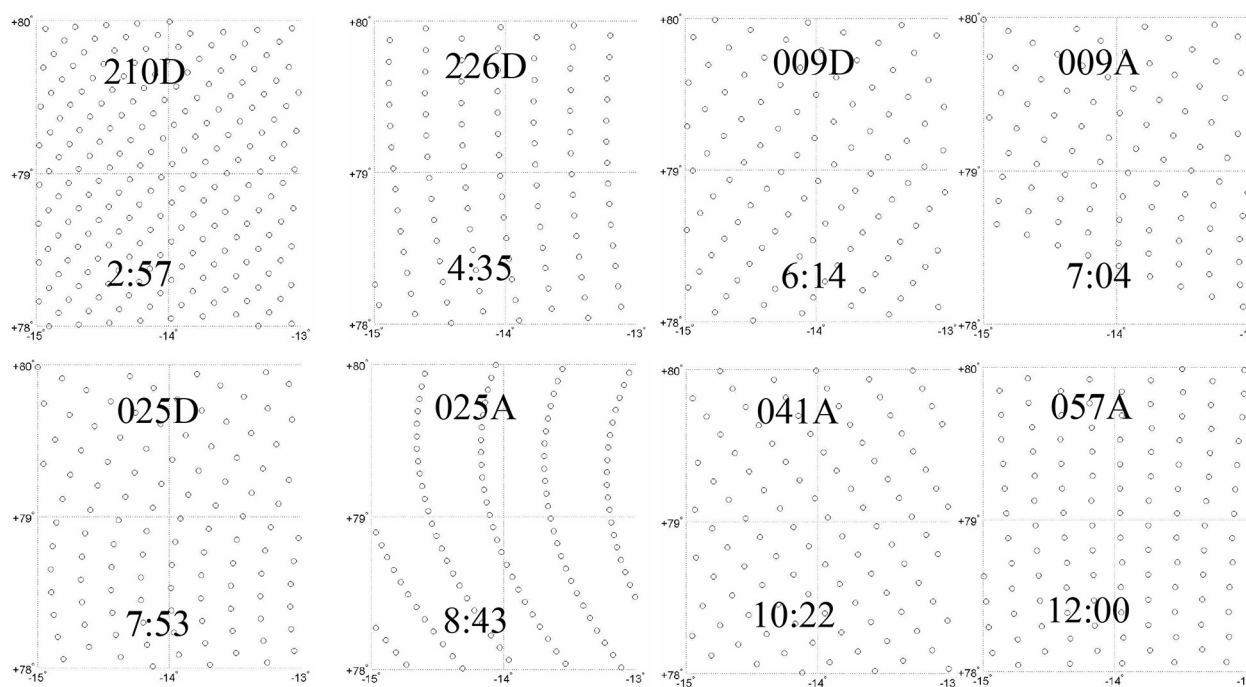


Рис. 4. Карты расположения центров элементов координатной сетки данных Level 1R для восьми файлов данных измерений за 5 августа 2022 г., попадающих в область 1 на рис. 3. Номер сверху каждой карты соответствует номеру витка в системе нумерации файлов JAXA, время внизу каждой карты — времени начала витка

При создании среднесуточного продукта Level 3 значения T_B на нерегулярных сетках Level 1R (разных для каждого витка измерений) пересчитываются на регулярную 10-км сетку PS методом ближайшего соседа для получения значений T_B на этой сетке (T_B^{PS}), после чего вычисляется арифметическое среднее. В результате такой процедуры информация из данных

Level 1R за весь день используется не оптимальным образом. Рисунок 5а иллюстрирует расположение центров нерегулярных сеток для всех измерений, попадающих в область 1 на рис. 3, за одни сутки, а рис. 5б — расположение центров сетки PS.

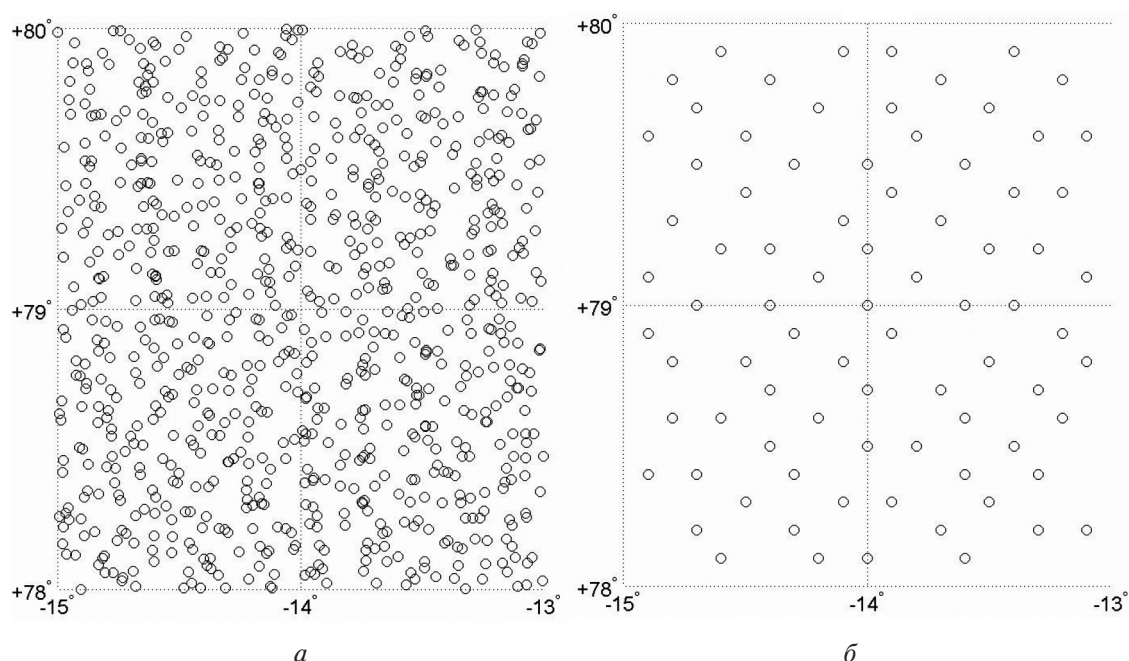


Рис. 5. Карта расположения центров, попадающих в область 1 на рис. 3: а — нерегулярные сетки для всех измерений Level 1R за одни сутки 5 августа 2022 г.; б — сетка PS

Минимальное расстояние от центров нерегулярных сеток данных Level 1R до центров сетки PS в зависимости от расположения центра на карте Арктики представлено на рис. 6а, а его распределение — на рис. 6б.

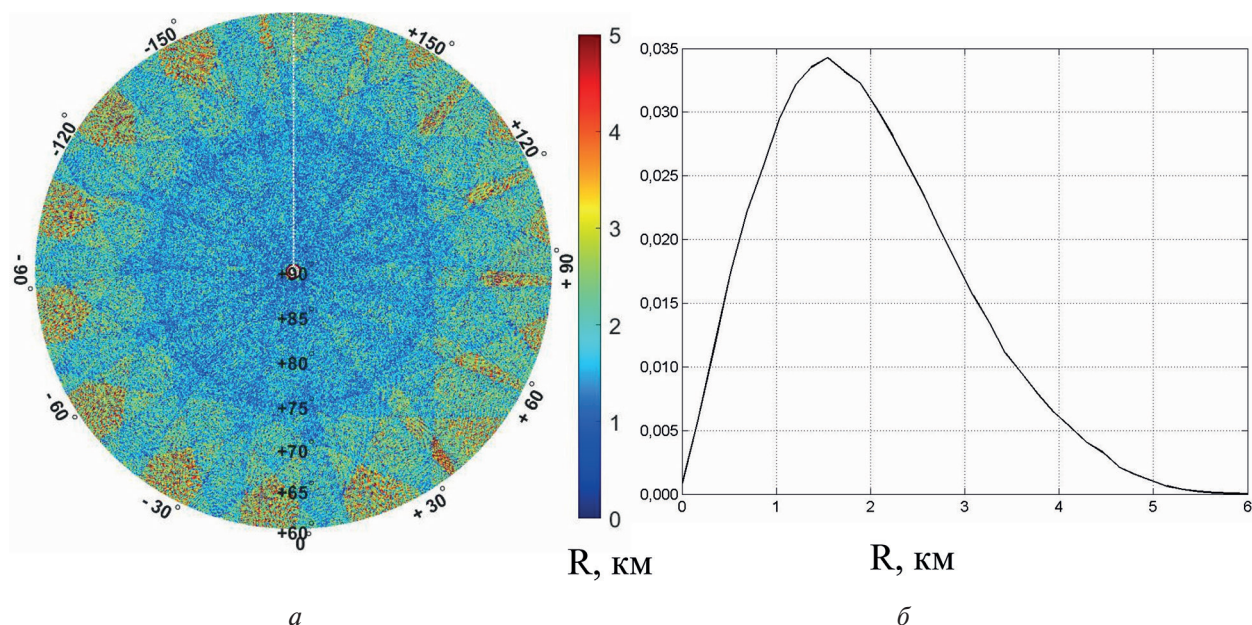


Рис. 6. Карта минимальных за день расстояний R от центров нерегулярных сеток данных Level 1R до центров сетки PS (а), функция распределения PDF (англ. Probability Distribution Function) R для широты выше 60° с. ш. (б)

Рисунок 6 иллюстрирует тот факт, что для каждого центра регулярной сетки PS за сутки найдётся измерение Level 1R, центр которого расположен на расстоянии R от 0 до 5 км (80 % значений R меньше 3 км, максимуму PDF соответствует значение $R_0 = 1,5$ км). Поэтому если при расчёте среднесуточных значений будут использоваться значения T_B на минимальном расстоянии от центров сетки PS, результаты не будут (или будут в меньшей степени) сглаживаться за счёт усреднения значений, находящихся далеко, и будут иметь большую чёткость. Для этого необходимо уменьшить размер элементов регулярной сетки для приведения его в соответствие с R_0 и использовать для расчёта значений T_B на новой сетке билинейную интерполяцию данных. В этом случае ни одно из измерений, находящихся максимально близко к центру элемента новой сетки, при усреднении не будет потеряно.

Рисунок 7 демонстрирует результат стандартного пересчёта данных при интерполяции для T_B на 6,9 ГГц для участка 1 на рис. 3. При вычислении среднесуточных продуктов Level 3 вначале каждый виток данных Level 1R интерполируется на сетку PS, а затем проводится осреднение данных.

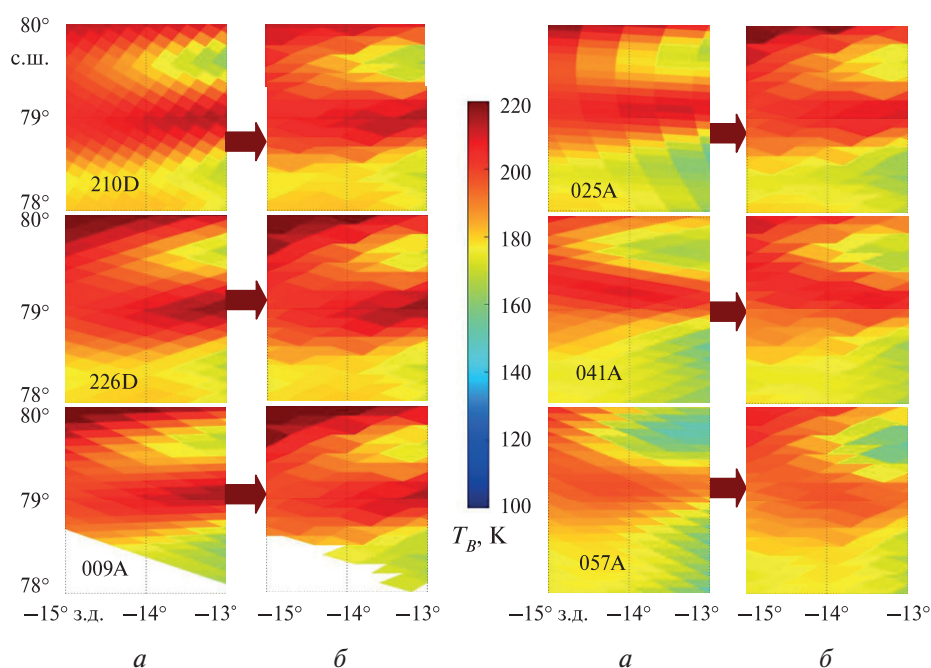


Рис. 7. Радиояркостьная температура T_B на частоте 6,9 ГГц, Н-поляризация, 5 августа 2022 г.: а — данные Level 1R на нерегулярной сетке; б — данные Level 1R, интерполированные на регулярную сетку PS методом ближайшего соседа ($T_{B\ 10\text{ км}}^{\text{cp}}$)

Рисунок 8 (см. с. 67) иллюстрирует результаты интерполяции данных Level 1R на новую регулярную сетку координат с разрешением 1 км. Сетка создана с использованием параметров проекции NSIDC Northern Hemisphere Projection Based on WGS 1984 (см. описание на ресурсе <https://nsidc.org/data/user-resources/help-center/guide-nsids-polar-stereographic-projection>). Данная проекция используется JAXA при создании сетки PS.

Рисунок 9 (см. с. 67) иллюстрирует разницу в среднесуточных полях T_B на частоте 6,9 ГГц, Н-поляризация, для рассмотренного участка при интерполяции на стандартную регулярную сетку PS с 10-км пространственным разрешением и на новую регулярную 1-км сетку.

Следует отметить, что поле T_B^{cp} , представленное на рис. 9б, не получить сглаживанием поля на рис. 9а. Сглаживание (или интерполяция на 1-км сетку) $T_{B\ 10\text{ км}}^{\text{cp}}$ приводит к большей размытости поля и уменьшению изменчивости T_B . Количественная оценка повышения детальности полей T_B^{cp} с помощью предложенного подхода может быть сделана посредством расчёта пространственной изменчивости σ среднесуточных полей $T_{B\ 1\text{ км}}^{\text{cp}}$ на частоте 6,9 ГГц на

10-км сетке PS как среднеквадратичного отклонения $T_{B\ 1\text{ км}}$ от среднего значения в пикселе размером 10×10 км:

$$\sigma = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (T_{B\ 1\text{ км}_i} - \overline{T_{B\ 1\text{ км}}})^2},$$

где $\overline{T_{B\ 1\text{ км}}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{B\ 1\text{ км}_i}$ — среднее значение $T_{B\ 1\text{ км}}$ в элементе сетки PS; N — количество элементов 1-км сетки в элементе сетки PS ($N = 100$). Распределение σ для T_B на частоте 6,9 ГГц на Н- и V-поляризации представлено на рис. 10 (см. с. 68).

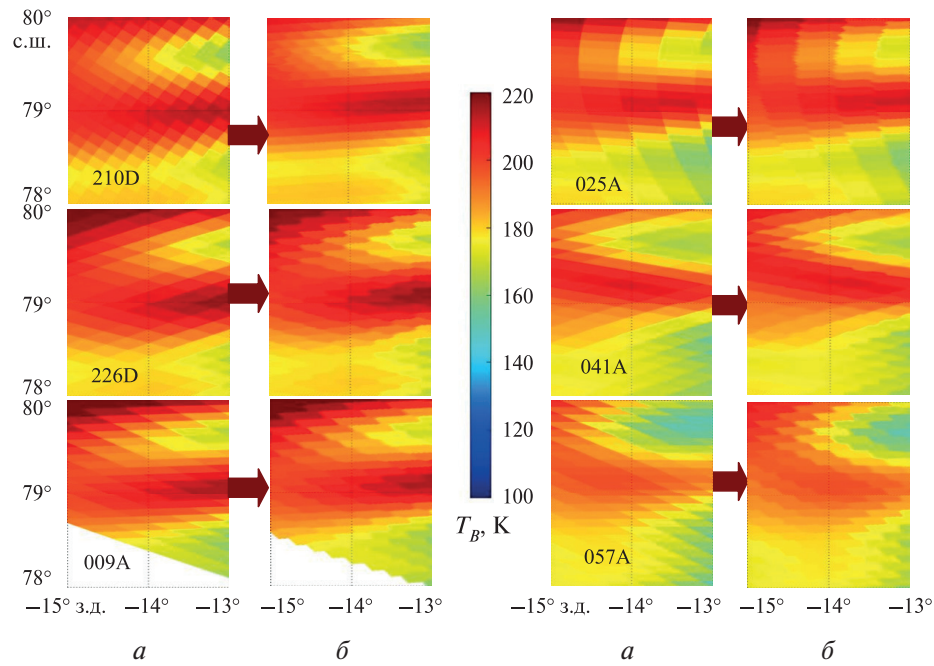


Рис. 8. Радиояркостьная температура T_B на частоте 6,9 ГГц, Н-поляризация, 5 августа 2022 г.: a — данные Level 1R на нерегулярной сетке; b — данные Level 1R, интерполированные на регулярную 1-км сетку методом билинейной интерполяции ($T_{B\ 1\text{ км}}$)

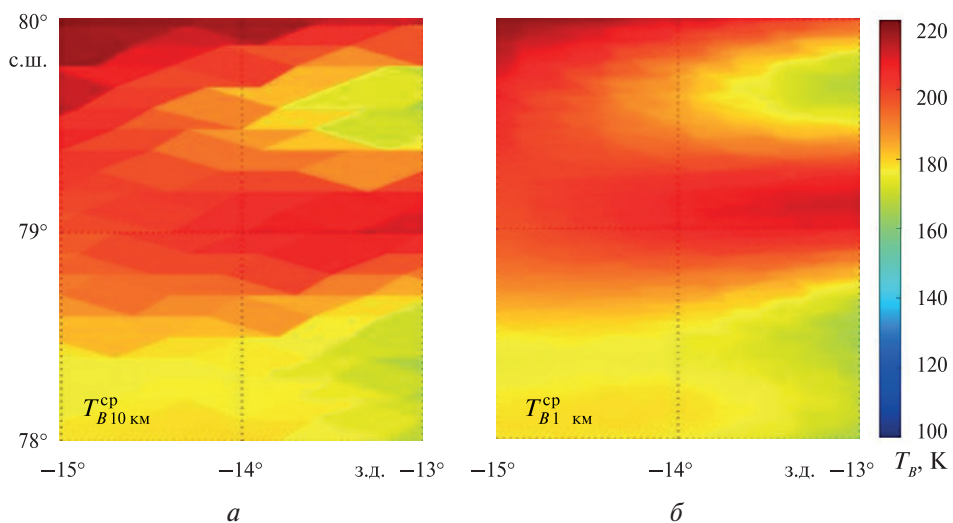


Рис. 9. Среднесуточные значения T_B на частоте 6,9 ГГц, Н-поляризация, 5 августа 2022 г.: a — стандартный продукт Level 3 на 10-км сетке PS ($T_{B\ 10\text{ км}}^{cp}$); b — данные, полученные путём усреднения значений T_B Level 1R, предварительно интерполированных на регулярную 1-км сетку ($T_{B\ 1\text{ км}}^{cp}$)

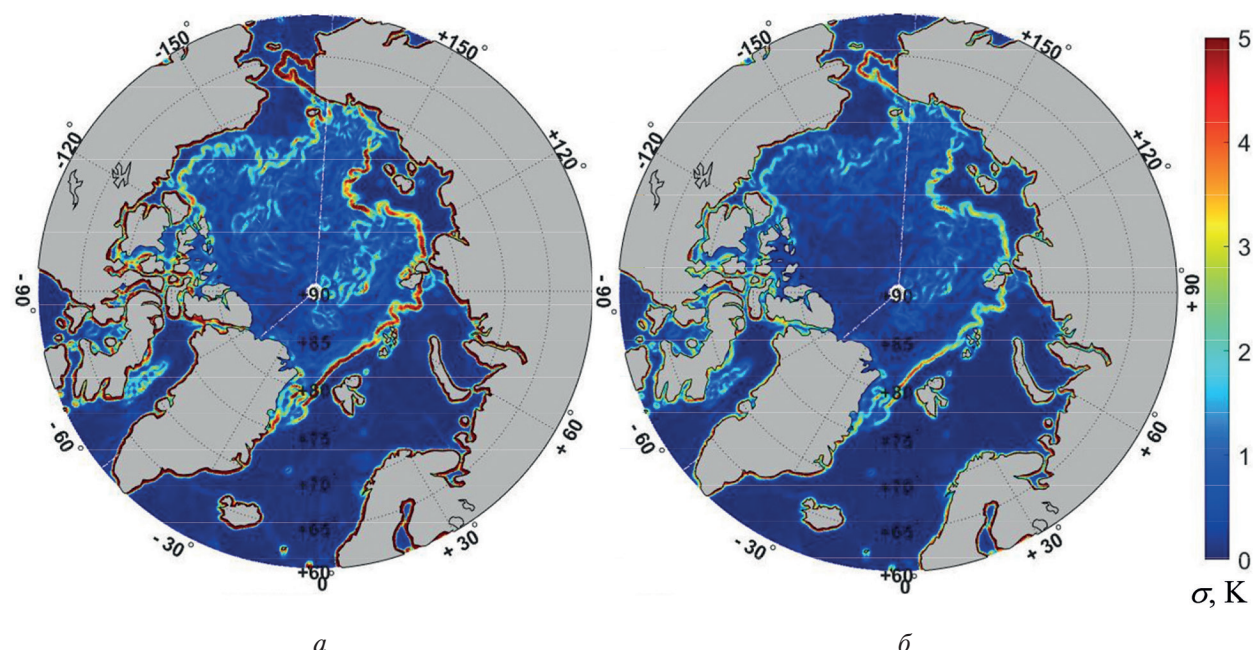


Рис. 10. Пространственная изменчивость σ среднесуточных полей $T_{B1\text{км}}^{\text{cp}}$ на частоте 6,9 ГГц на 10-км сетке PS, 5 августа 2022 г.: а — Н-поляризация; б — V-поляризация

Значения σ максимальны (от 5 до 7 К на Н-поляризации, от 2 до 4 К на V-поляризации) на кромке льда, что, очевидно, связано с временной изменчивостью положения кромки и погрешностями допущения стационарного состояния системы подстилающая поверхность — атмосфера, неизбежными при анализе среднесуточных данных.

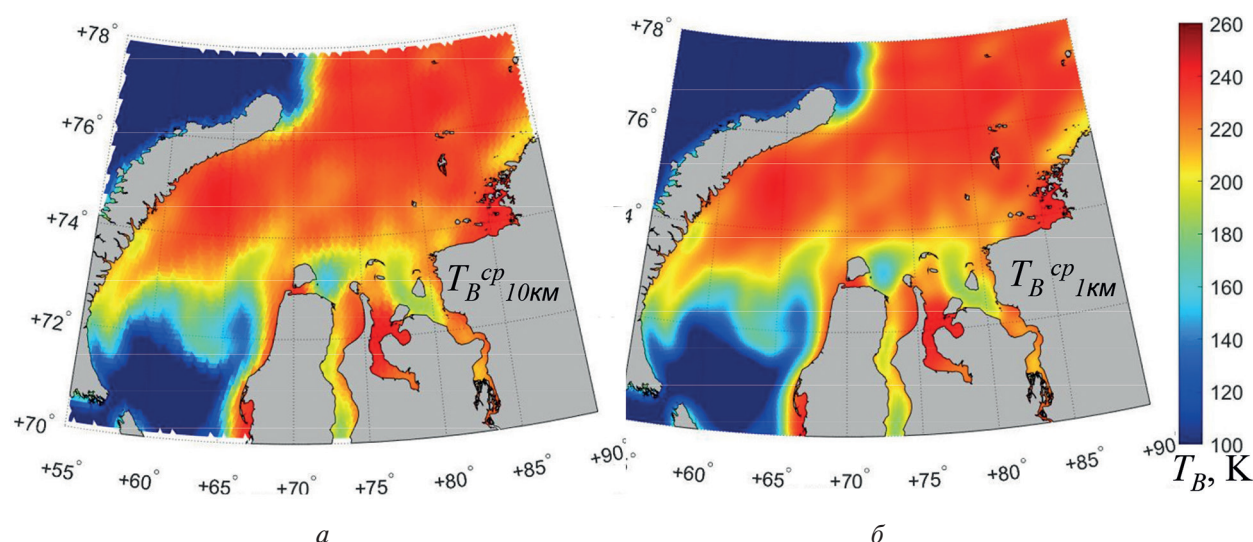


Рис. 11. Поля среднесуточных значений T_B на 6,9 ГГц, Н-поляризация, 1 января 2018 г.: а — стандартный продукт Level 3 на 10-км сетке PS ($T_{B10\text{км}}^{\text{cp}}$); б — данные, полученные с использованием усреднения значений T_B Level 1R, предварительно интерполированных на регулярную 1-км сетку ($T_{B1\text{км}}^{\text{cp}}$)

Иллюстрация повышения чёткости полей T_B на частоте 6,9 ГГц, Н-поляризация, позволяющей однозначно идентифицировать кромку льда в Карском море по пороговым значениям T_B , представлена на рис. 11.

Рисунок 12 иллюстрирует возможность идентификации кромки льда 1 января 2018 г. у западного берега полуострова Ямал в полях T_B повышенной информативности по пороговым значениям T_B на частоте 6,9 ГГц, Н-поляризация. Кромка льда 1 выделена в поле сплочённости ледяного покрова (SIC) по 15%-м пороговым значениям в спутниковом продукте университета Бремена (нем. Universität Bremen) с разрешением 3,125 км (данные были скачаны с ресурса http://iup.physik.uni-bremen.de:8084/amsr2data/asi_daygrid_swath/n3125/, продукт рассчитывается по данным AMSR2 с помощью алгоритма ASI (Spreen et al., 2008)) (см. рис. 12а, кромка 1 представлена в голубом цвете). Кромка льда 1 наложена на рис. 12б и в в чёрном цвете. Рисунок 12б представляет 10-км поле T_B стандартного продукта Level 3 $\left(T_{B10\text{ км}}^{\text{cp}}\right)$, а рис. 12в — 1-км поле T_B $\left(T_{B1\text{ км}}^{\text{cp}}\right)$. Кромки льда 2 и 3, обозначенные на рис. 12б и в красным цветом, определены по пороговым значениям $T_{B10\text{ км}}^{\text{cp}}$ и $T_{B1\text{ км}}^{\text{cp}}$ соответственно, равным 160 К. Из рис. 12 видно, что кромка 3 лежит существенно ближе к кромке 1, чем кромка 2, за исключением небольшого участка на севере.

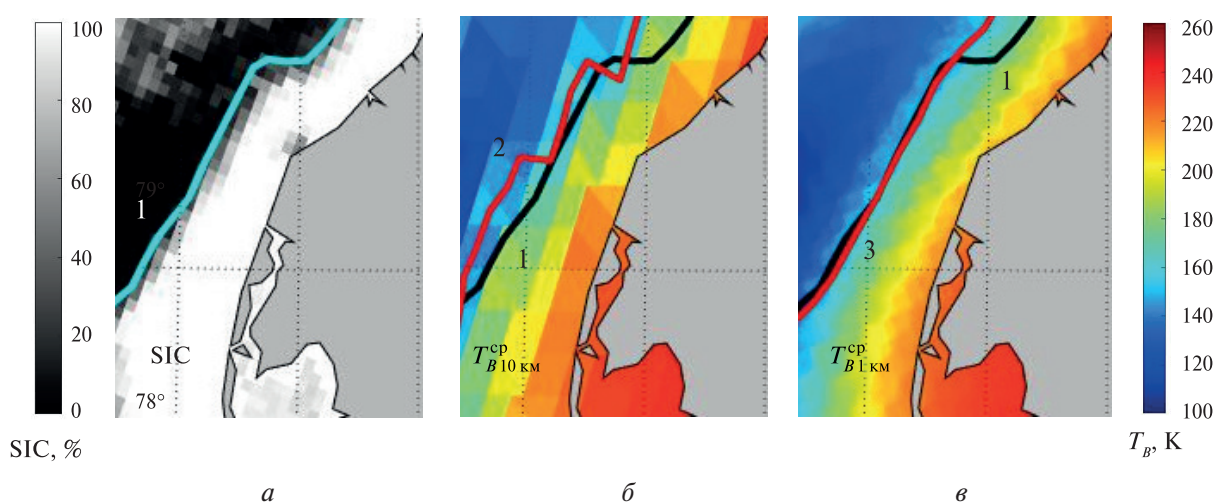


Рис. 12. Кромка льда у западного берега полуострова Ямал 1 января 2018 г.: а — сплочённость ледяного покрова (SIC) по данным среднесуточного продукта университета Бремена с разрешением 3,125 км; б — поле среднесуточных значений T_B на частоте 6,9 ГГц, Н-поляризация, стандартный продукт Level 3 на 10-км сетке PS $\left(T_{B10\text{ км}}^{\text{cp}}\right)$; в — значения T_B , полученные путём усреднения данных Level 1R, предварительно интерполированных на регулярную 1-км сетку $\left(T_{B1\text{ км}}^{\text{cp}}\right)$. Кромка льда 1 (голубая линия (а) и чёрная (б, в)) выделена по 15%-м пороговым значениям SIC. Кромки льда 2 и 3 (красные линии (б, в)) выделены по пороговым значениям $T_{B10\text{ км}}^{\text{cp}}$ и $T_{B1\text{ км}}^{\text{cp}}$ соответственно

Заключение

В настоящей работе мы дали краткий обзор методов улучшения пространственного разрешения спутниковых микроволновых измерений, целью которого было очертить проблемы, возникающие при желании увеличить детальность полей микроволновых измерений. В качестве альтернативы подобным методам, требующим знания функций диаграмм направленности антенн и ведущим к увеличению уровня шумов, предложен метод повышения детальности и информативности среднесуточных измерений радиометра AMSR2 на каналах на частоте 6,9 ГГц для региона Арктики. Суть метода заключается в использовании перед усреднением данных регулярной координатной сетки высокого (1×1 км) пространственного разрешения и пересчёте исходных данных T_B Level 1R на новую сетку методом билинейной интерполяции. Такой подход позволяет сохранить в среднесуточных данных максимум информации от всех измерений за сутки и избежать избыточного сглаживания данных, неизбежного при использовании традиционных подходов. В результате эффективное пространственное разрешение

данных повышается за счёт высокого временного разрешения радиометрических измерений в высоких широтах.

Данный подход может быть применён для изучения свойств подстилающей поверхности в высоких широтах на основании анализа измерений AMSR2 на каналах на частоте 6,9 ГГц, не забывая все те погрешности, которые обусловлены использованием усреднённых за какой-либо промежуток времени данных.

Безусловно, поскольку реальное пространственное разрешение измерений не становится 1×1 км, а остаётся 35×62 км, без применения алгоритмов, использующих инверсию функций диаграммы направленности антенны, с помощью предложенного метода не достичь километровой детальности полей T_B на частоте 6,9 ГГц. Однако информативность среднесуточных полей увеличивается, а сами поля T_B на частоте 6,9 ГГц становятся более чёткими.

Особенно перспективным видится применение предложенного подхода для восстановления сплочённости морского льда по данным измерений на частоте 6,9 ГГц. Из-за низкого пространственного разрешения в обычной практике каналы С-диапазона не используются для восстановления сплочённости льда, несмотря на их очевидные преимущества: влияние атмосферы на регистрируемое излучение мало, а диапазоны изменчивости излучения льда и воды существенно уже, чем на более высоких частотах. Разработкой такого алгоритма и обоснованием преимуществ его использования авторы планируют заняться в ближайшее время.

Исследования, представленные в данной статье, выполнены за счёт государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № FSZU-2025-0005 «Система «морской лёд – океан – атмосфера» Арктики: развитие спутниковых методов и моделей».

Литература

1. Заболотских Е. В. Восстановление значений водозапаса облаков над морским льдом Арктики по данным радиометра AMSR2 // Метеорология и гидрология. 2025. № 11. С. 5–11. DOI: 10.52002/0130-2906-2025-11-5-11.
2. Заболотских Е. В., Шапрон Б. Повышение пространственного разрешения каналов С-диапазона радиометра AMSR2 для мониторинга арктических морей с использованием каналов измерений на 36,5 ГГц // Морской гидрофиз. журн. 2025. Т. 41. № 5. С. 694–714.
3. Backus G. E., Gilbert J. F. Numerical applications of a formalism for geophysical inverse problems // Geophysical J. Intern. 1967. V. 13. No. 1–3. P. 247–276.
4. Bai Y., Zheng Z., Shen J. et al. Spatial resolution enhancement of Microwave Radiation Imager (MWRI) data // Remote Sensing. 2025. V. 17. No. 6. Article 1034. DOI: 10.3390/rs17061034.
5. Brodzik M. J., Long D. G., Hardman M. A. Calibrated Passive Microwave Daily EASE-Grid 2.0 Brightness Temperature ESDR (CETB). Algorithm theoretical basis document. Version 2.1. NSIDC, 2024. 98 p. DOI: 10.5281/zenodo.11626219.
6. Choi M., Hur Y. A microwave-optical/infrared disaggregation for improving spatial representation of soil moisture using AMSR-E and MODIS products // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 124. P. 259–269. DOI: 10.1016/j.rse.2012.05.009.
7. Comiso J. C. Enhanced sea ice concentrations and ice extents from AMSR-E data // J. Remote Sensing Soc. of Japan. 2009. V. 29. No. 1. P. 199–215. DOI: 10.11440/rssj.29.199.
8. Descriptions of GCOM-W1 AMSR2 Level 1R and Level 2 algorithms. No. NDX-120015A. Earth Observation Research Center, Japan Aerospace Exploration Agency, 2013. 119 p.
9. Early D. S., Long D. G. Image reconstruction and enhanced resolution imaging from irregular samples // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2001. V. 39. No. 2. P. 291–302. DOI: 10.1109/36.905237.
10. Greenwald T. J., Stephens G. L., Vonder Haar T. H., Jackson D. L. A physical retrieval of cloud liquid water over the global oceans using Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) observations // J. Geophysical Research: Atmospheres. 1993. V. 98. No. D10. P. 18471–18488. DOI: 10.1029/93JD00339.
11. Gu H., England A. W. AMSR-E data resampling with near-circular synthesized footprint shape and noise/resolution tradeoff study // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2007. V. 45. No. 10. P. 3193–3203. DOI: 10.1109/TGRS.2007.895412.
12. Hu W., Yao Z., Chen S. et al. Spatial resolution and data integrity enhancement of microwave radiometer measurements using total variation deconvolution and bilateral fusion technique // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 14. Article 3502. DOI: 10.3390/rs14143502.

13. *Imaoka K., Maeda T., Kachi M. et al.* Status of AMSR2 instrument on GCOM-W1 // Proc. SPIE. Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization II. 2012. V. 8528. Article 852815. 6 p. DOI: 10.1117/12.977774.
14. *Lenti F., Nunziata F., Estatico C., Migliaccio M.* On the spatial resolution enhancement of microwave radiometer data in Banach spaces // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2013. V. 52. No. 3. P. 1834–1842. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2255614.
15. *Li Y., Hu W., Chen S. et al.* Spatial resolution matching of microwave radiometer data with convolutional neural network // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 20. Article 2432. DOI: 10.3390/rs11202432.
16. *Lindsley R. D., Long D. G.* Enhanced-resolution reconstruction of ASCAT backscatter measurements // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2015. V. 54. No. 5. P. 2589–2601. DOI: 10.1109/TGRS.2015.2503762.
17. *Long D. G., Daum D. L.* Spatial resolution enhancement of SSM/I data // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1998. V. 36. No. 2. P. 407–417. DOI: 10.1109/36.662726.
18. *Long D. G., Hardin P. J., Whiting P. T.* Resolution enhancement of spaceborne scatterometer data // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1993. V. 31. No. 3. P. 700–715. DOI: 10.1109/36.225536.
19. *Long D. G., Brodzik M. J., Hardman M. A.* Enhanced-resolution SMAP brightness temperature image products // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2019. V. 57. No. 7. P. 4151–4163. DOI: 10.1109/TGRS.2018.2889427.
20. *Long D. G., Brodzik M. J., Hardman M.* Evaluating the effective resolution of enhanced resolution SMAP brightness temperature image products // Frontiers in Remote Sensing. 2023. V. 4. Article 1073765. DOI: 10.3389/frsen.2023.1073765.
21. *Lu M., Hoang K. O., Kumarasiri A. D. T. N.* Temperature effects in AMSR2 soil moisture products and development of a removal method using data at ascending and descending overpasses // Remote Sensing. 2024. V. 16. No. 9. Article 1606. DOI: 10.3390/rs16091606.
22. *Maeda T., Tomii N., Seki M. et al.* Validation of hi-resolution sea surface temperature algorithm toward the satellite-borne microwave radiometer AMSR3 mission // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2021. V. 19. Article 4500305. DOI: 10.1109/LGRS.2021.3066534.
23. *Nunziata F., Alparone M., Camps A. et al.* An enhanced resolution brightness temperature product for future conical scanning microwave radiometers // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2021. V. 60. Article 5301812. DOI: 10.1109/TGRS.2021.3109376.
24. *Poe G. A.* Optimum interpolation of imaging microwave radiometer data // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1990. V. 28. No. 5. P. 800–810. DOI: 10.1109/36.58966.
25. *Serreze M. C., Cassano E., Crawford A. et al.* The observed evolution of Arctic amplification over the past 45 years // <https://egusphere.copernicus.org/>. Preprint egusphere-2025-3690. 2025. 22 p. DOI: 10.5194/egusphere-2025-3690.
26. *Sethmann R., Burns B. A., Heygster G. C.* Spatial resolution improvement of SSM/I data with image restoration techniques // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1994. V. 32. No. 6. P. 1144–1151. DOI: 10.1109/36.338362.
27. *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.
28. *Stogryn A.* Estimates of brightness temperatures from scanning radiometer data // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1978. V. 26. No. 5. P. 720–726. DOI: 10.1109/TAP.1978.1141919.
29. *Wentz F. J., Gentemann C., Smith D., Chelton D.* Satellite measurements of sea surface temperature through clouds // Science. 2000. V. 288. No. 5467. P. 847–850. DOI: 10.1126/science.288.5467.847.
30. *Xing D., Hou J., Huang C., Zhang W.* Estimation of snow depth from AMSR2 and MODIS data based on deep residual learning network // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 20. Article 5089. DOI: 10.3390/rs14205089.
31. *Zabolotskikh E. V., Khvorostovsky K. S., Chapron B.* An advanced algorithm to retrieve total atmospheric water vapor content from the advanced microwave scanning radiometer data over sea ice and sea water surfaces in the Arctic // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2020. V. 58. No. 5. P. 3123–3135. DOI: 10.1109/TGRS.2019.2948289.

Improvement of daily averaged fields of satellite microwave radiometer measurements

E. V. Zabolotskikh, D. E. Yakovlev, E. V. Lvova, M. D. Kudel, K. I. Yarusov

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg 192007, Russia

E-mail: liza@rshu.ru

Data of satellite microwave radiometers ensure global monitoring of atmospheric and surface parameters independently of cloud cover and sunlight. Still, low spatial resolution of brightness temperature T_B measurements at low-frequency channels hampers their application. A brief overview of existing methods for increasing the spatial resolution of microwave measurements is given. We also present a method for improving the quality and informational content of daily averaged measurements of the Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2) at C-band channels for the Arctic region. The method requires usage of a regular coordinate grid with a resolution of 1×1 km before averaging the data and recalculating the initial Level 1R T_B data onto the new grid with bilinear interpolation. This method preserves the maximum amount of information from all measurements of the day in the daily averaged data and avoids excessive data smoothing, which is inevitable with traditional approaches. As a result, the informational content of the data and the sharpness of T_B fields is increased due to high temporal resolution of radiometric measurements at high latitudes. Examples of improved T_B fields at 6.9 GHz compared to the standard product of the Japan Aerospace Exploration Agency are presented. This approach can be used to study the underlying surface based on the analysis of AMSR2 measurements at 6.9 GHz. The approach has also great potential for sea ice concentration retrieval from measurements at 6.9 GHz as both atmospheric influence and variability of sea ice and sea water microwave emission are minimal for this channel.

Keywords: Arctic, AMSR2, brightness temperature fields, spatial resolution, daily averaged data

Accepted: 05.03.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-3-59-73

References

1. Zabolotskikh E. V., Cloud liquid water path retrieval over the Arctic sea ice from the AMSR2 data, *Meteorologiya i gidrologiya*, 2025, No. 11, pp. 5–11 (in Russian), DOI: 10.52002/0130-2906-2025-11-5-11.
2. Zabolotskikh E. V., Chapron B., Enhancing the spatial resolution of the AMSR2 C-band radiometer channels for monitoring the Arctic seas using the 36.5 GHz measurement channels, *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2025, V. 41, No. 5, pp. 694–714 (in Russian).
3. Backus G. E., Gilbert J. F., Numerical applications of a formalism for geophysical inverse problems, *Geophysical J. Intern.*, 1967, V. 13, No. 1–3, pp. 247–276.
4. Bai Y., Zheng Z., Shen J. et al., Spatial resolution enhancement of Microwave Radiation Imager (MWRI) data, *Remote Sensing*, 2025, V. 17, No. 6, Article 1034, DOI: 10.3390/rs17061034.
5. Brodzik M. J., Long D. G., Hardman M. A., *Calibrated Passive Microwave Daily EASE-Grid 2.0 Brightness Temperature ESDR (CETB). Algorithm theoretical basis document. Version 2.1*, NSIDC, 2024, 98 p., DOI: 10.5281/zenodo.11626219.
6. Choi M., Hur Y., A microwave-optical/infrared disaggregation for improving spatial representation of soil moisture using AMSR-E and MODIS products, *Remote Sensing of Environment*, 2012, V. 124, pp. 259–269, DOI: 10.1016/j.rse.2012.05.009.
7. Comiso J. C., Enhanced sea ice concentrations and ice extents from AMSR-E data, *J. Remote Sensing Soc. of Japan*, 2009, V. 29, No. 1, pp. 199–215, DOI: 10.11440/rssj.29.199.
8. *Descriptions of GCOM-W1 AMSR2 Level 1R and Level 2 algorithms*, No. NDX-120015A, Earth Observation Research Center, Japan Aerospace Exploration Agency, 2013, 119 p.
9. Early D. S., Long D. G., Image reconstruction and enhanced resolution imaging from irregular samples, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2001, V. 39, No. 2, pp. 291–302, DOI: 10.1109/36.905237.
10. Greenwald T. J., Stephens G. L., Vonder Haar T. H., Jackson D. L., A physical retrieval of cloud liquid water over the global oceans using Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) observations, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 1993, V. 98, No. D10, pp. 18471–18488, DOI: 10.1029/93JD00339.

11. Gu H., England A. W., AMSR-E data resampling with near-circular synthesized footprint shape and noise/resolution tradeoff study, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2007, V. 45, No. 10, pp. 3193–3203, DOI: 10.1109/TGRS.2007.895412.
12. Hu W., Yao Z., Chen S. et al., Spatial resolution and data integrity enhancement of microwave radiometer measurements using total variation deconvolution and bilateral fusion technique, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 14, Article 3502, DOI: 10.3390/rs14143502.
13. Imaoka K., Maeda T., Kachi M. et al., Status of AMSR2 instrument on GCOM-W1, *Proc. SPIE. Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization II*, 2012, V. 8528, Article 852815, 6 p., DOI: 10.1117/12.977774.
14. Lenti F., Nunziata F., Estatico C., Migliaccio M., On the spatial resolution enhancement of microwave radiometer data in Banach spaces, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2013, V. 52, No. 3, pp. 1834–1842, DOI: 10.1109/TGRS.2013.2255614.
15. Li Y., Hu W., Chen S. et al., Spatial resolution matching of microwave radiometer data with convolutional neural network, *Remote Sensing*, 2019, V. 11, No. 20, Article 2432, DOI: 10.3390/rs11202432.
16. Lindsley R. D., Long D. G., Enhanced-resolution reconstruction of ASCAT backscatter measurements, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2015, V. 54, No. 5, pp. 2589–2601, DOI: 10.1109/TGRS.2015.2503762.
17. Long D. G., Daum D. L., Spatial resolution enhancement of SSM/I data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1998, V. 36, No. 2, pp. 407–417, DOI: 10.1109/36.662726.
18. Long D. G., Hardin P. J., Whiting P. T., Resolution enhancement of spaceborne scatterometer data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1993, V. 31, No. 3, pp. 700–715, DOI: 10.1109/36.225536.
19. Long D. G., Brodzik M. J., Hardman M. A., Enhanced-resolution SMAP brightness temperature image products, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2019, V. 57, No. 7, pp. 4151–4163, DOI: 10.1109/TGRS.2018.2889427.
20. Long D. G., Brodzik M. J., Hardman M., Evaluating the effective resolution of enhanced resolution SMAP brightness temperature image products, *Frontiers in Remote Sensing*, 2023, V. 4, Article 1073765, DOI: 10.3389/frsen.2023.1073765.
21. Lu M., Hoang K. O., Kumarasiri A. D. T. N., Temperature effects in AMSR2 soil moisture products and development of a removal method using data at ascending and descending overpasses, *Remote Sensing*, 2024, V. 16, No. 9, Article 1606, DOI: 10.3390/rs16091606.
22. Maeda T., Tomii N., Seki M. et al., Validation of hi-resolution sea surface temperature algorithm toward the satellite-borne microwave radiometer AMSR3 mission, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, V. 19, Article 4500305, DOI: 10.1109/LGRS.2021.3066534.
23. Nunziata F., Alparone M., Camps A. et al., An enhanced resolution brightness temperature product for future conical scanning microwave radiometers, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2021, V. 60, Article 5301812, DOI: 10.1109/TGRS.2021.3109376.
24. Poe G. A., Optimum interpolation of imaging microwave radiometer data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1990, V. 28, No. 5, pp. 800–810, DOI: 10.1109/36.58966.
25. Serreze M. C., Cassano E., Crawford A. et al., The observed evolution of Arctic amplification over the past 45 years, <https://egusphere.copernicus.org/>, Preprint egusphere-2025-3690, 2025, 22 p., DOI: 10.5194/egusphere-2025-3690.
26. Sethmann R., Burns B. A., Heygster G. C., Spatial resolution improvement of SSM/I data with image restoration techniques, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1994, V. 32, No. 6, pp. 1144–1151, DOI: 10.1109/36.338362.
27. 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.
28. Stogryn A., Estimates of brightness temperatures from scanning radiometer data, *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 1978, V. 26, No. 5, pp. 720–726, DOI: 10.1109/TAP.1978.1141919.
29. Wentz F. J., Gentemann C., Smith D., Chelton D., Satellite measurements of sea surface temperature through clouds, *Science*, 2000, V. 288, No. 5467, pp. 847–850, DOI: 10.1126/science.288.5467.847.
30. Xing D., Hou J., Huang C., Zhang W., Estimation of snow depth from AMSR2 and MODIS data based on deep residual learning network, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 20, Article 5089, DOI: 10.3390/rs14205089.
31. Zabolotskikh E. V., Khvorostovsky K. S., Chapron B., An advanced algorithm to retrieve total atmospheric water vapor content from the advanced microwave scanning radiometer data over sea ice and sea water surfaces in the Arctic, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2020, V. 58, No. 5, pp. 3123–3135, DOI: 10.1109/TGRS.2019.2948289.