

Спутниковое микроволновое зондирование морского льда Арктики. Обзор

Е. В. Заболотских, К. С. Хворостовский, М. А. Животовская,
Е. В. Львова, С. М. Азаров, Е. А. Балашова

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

Представлен обзор исследования микроволновых методов восстановления характеристик ледяного покрова Арктики по данным измерений спутниковых микроволновых инструментов. Описываются базовые физические принципы, лежащие в основе методов оценки тех или иных параметров морского льда. Анализируются как основополагающие работы, направленные на разработку методов, так и практические исследования, связанные с их применением. Обзор структурирован в виде разделов, каждый из которых посвящён отдельному типу инструментов. Внутри разделов анализ проводится отдельно по каждому из восстанавливаемых параметров. Обсуждаются вопросы, связанные с разработкой методов восстановления сплошности ледяного покрова (*англ.* Sea Ice Concentration — SIC), типов морского льда, его температуры и толщины по данным спутниковых микроволновых радиометров. Представлена классификация методов восстановления SIC и анализ источников погрешностей, а также рассмотрены ограничения возможностей по оценке других параметров ледяного покрова по данным радиометров. Рассматриваются методы восстановления границ и возрастного состава морского льда в Арктике по данным спутниковых скаттерометров. Обсуждаются новые возможности использования скаттерометрических измерений, обусловленные их высоким временным разрешением в полярных регионах. Анализируются подходы, лежащие в основе классификации морской поверхности по данным радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) и основные проблемы классификации с использованием доступных данных РСА Sentinel-1.

Ключевые слова: Арктика, параметры ледяного покрова, спутниковое дистанционное зондирование, микроволновые методы, радиометры, скаттерометры, РСА

Одобрена к печати: 27.01.2023
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-9-34

Введение

Современные средства мониторинга параметров ледяного покрова Арктики невозможны без использования методов спутникового дистанционного зондирования. Эти методы обеспечивают оперативное и регулярное получение информации о морском ледяном покрове, несмотря на огромную пространственную протяжённость замерзающих акваторий полярных регионов и её удаленность (Смирнов и др., 2011). Регулярные спутниковые измерения низкого пространственного разрешения обеспечивают исследователей данными о распределении ледяного покрова в Арктике и позволяют выявлять климатические тенденции и тренды последних десятилетий (Comiso et al., 2008; Ricker et al., 2017). Именно спутниковые микроволновые данные низкого пространственного разрешения позволили выявить важную тенденцию сокращения общей площади ледяного покрова в Арктике и уменьшения его средней толщины, наблюдающуюся последние десятилетия. В то же время спутниковые данные высокого пространственного разрешения, доступность которых стремительно расширяется в последние годы, позволяют не только классифицировать морскую поверхность по типу лёд/вода (Geldsetzer, Yackel, 2009), но и определять возраст льда, коррелирующий с его толщиной (Zakhvatkina et al., 2012). Детальная информация о пространственной структуре ледяного покрова высокого разрешения необходима для обеспечения безопасной навигации и эффективной народнохозяйственной деятельности в Арктике. Традиционно для получения такой

информации используются измерения радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) и снимки инфракрасного (ИК) и оптического диапазона (Смирнов и др., 2011).

Возможности оптического диапазона при изучении ледяного покрова Арктики весьма ограничены из-за полярной ночи и постоянной облачности (Chan, Comiso, 2012). Хотя объективность и однозначность в интерпретации снимков выступают несомненными достоинствами этих методов: изображение льда на снимках оптического диапазона близко к воспринимаемому человеческим глазом. ИК-методы, по сравнению с оптическими, не зависят от солнечного освещения, но их применение также требует ясной погоды. Оптические и ИК-снимки в ясную погоду позволяют строить карты характеристик морского льда с умеренным пространственным разрешением (от сотен метров до километра) (Comiso, Steffen, 2001; Emery et al., 1991; Meier, 2005; Steffen, Schweiger, 1990; Zibordi et al., 1995). В основе интерпретации снимков спектральных радиометров лежат либо различия в температуре воды и льда (ИК-диапазон), либо различия в коэффициентах отражения воды и льда (видимый диапазон) (Drüe, Heinemann, 2004). Микроволновый, или сверхвысокочастотный, диапазон электромагнитного спектра наиболее пригоден для мониторинга ледяного покрова полярных регионов в силу всепогодности и независимости от солнечного освещения (Microwave..., 1992).

Возможность всепогодного круглосуточного наблюдения за морским льдом с помощью микроволновых спутниковых измерений реализуется на сегодняшний день с помощью активных и пассивных микроволновых инструментов. Данные пассивных инструментов — микроволновых сканирующих радиометров — в зависимости от частот измерений дают возможность идентифицировать тип поверхности (морской лёд или морская вода) (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)). Физической основой методов определения параметров ледяного покрова по данным измерений спутниковых микроволновых радиометров становится существенная разница в коэффициентах излучения морского льда и морской воды, обусловленная, в свою очередь, разницей в значениях комплексной диэлектрической проницаемости. В диапазоне 1–100 ГГц действительная часть диэлектрической проницаемости (ϵ') морского льда колеблется от 3 до 4. В то время как для воды ϵ' изменяется от ~80 (на 1 ГГц) до ~10 (на 100 ГГц). Мнимая часть диэлектрической проницаемости льда (ϵ'') составляет ~0,001–0,0001, а у воды эта характеристика на несколько порядков выше и сильно изменяется для данного диапазона частот (Борен, Хафмен, 1986). Разница в коэффициентах излучения льда и воды обеспечивает возможность уверенной классификации поверхности по типу лёд/вода и служит основой для восстановления такого важнейшего параметра ледяного покрова, как его сплочённость (*англ.* Sea Ice Concentration — SIC) — доля поверхности, занимаемая морским льдом. SIC представляет собой ключевой климатически значимый параметр, позволяющий оценивать межгодовую и многолетнюю изменчивость ледяного покрова и изучать границы его распространения (Comiso et al., 2017). Пространственное разрешение ледовых геофизических продуктов, основанных на измерениях микроволновых радиометров, существенно ниже разрешения спектральных радиометров с каналами оптического и ИК-диапазона и составляет десятки и сотни квадратных километров.

Данные активных микроволновых инструментов используются как для классификации поверхности по типу лёд/вода (радиолокаторы, скаттерометры, альтиметры, РСА) (Dierking, 2013b), так и для восстановления типа льда (скаттерометры, радиолокаторы, альтиметры) (Kwok et al., 1992; Rinne, Similä, 2016; Swan, Long, 2012) и его толщины (альтиметры) (Khvorostovsky, Rampal, 2016). Регулярные глобальные спутниковые микроволновые измерения радиометров и скаттерометров позволяют оценивать границы распространения ледяного покрова в Арктике (Rivas et al., 2018). Из-за сложности геофизических модельных функций (ГМФ) зависимости сигнала обратного рассеяния (σ^0) от угла наблюдения скаттерометрические измерения обычно не применяют для восстановления SIC, однако исследования последних лет открывают новые возможности по их использованию. Так, в работе (Заболотских и др., 2022а) обсуждается новый подход для восстановления границы ледяного покрова по данным спутниковых скаттерометров ASCAT (*англ.* Advanced Scatterometer), с помощью

которого можно устанавливать не только границы ледяного покрова, но и его площадь (через определение SIC). В работе (Заболотских и др., 2020а) показано, что измерения ASCAT могут быть использованы для определения крупномасштабных областей торосов в Арктике. Классификации типов льда по данным высокого разрешения РСА, в том числе её автоматизации, посвящено огромное количество работ (см., например, (Ressel et al., 2015; Scheuchl et al., 2001; Zakhvatkina et al., 2017)). Активно развиваются и методы расчёта дрейфа льда, основанные на анализе временной последовательности спутниковых микроволновых измерений (Girard-Ardhuin, Ezraty, 2012).

В настоящей работе представлен обзор исследований микроволновых методов восстановления характеристик ледяного покрова по данным измерений инструментов, позволяющих получать пространственное распределение этих характеристик: спутниковых радиометров, скаттерометров и РСА. Обзор условно разбит на разделы, посвящённые тем или иным типам инструментов или восстанавливаемым параметрам. Условность обусловлена тем, что в последние годы при интерпретации спутниковых данных всё больше развиваются синергетические подходы, позволяющие эффективно использовать преимущества измерений разного типа (активных и пассивных, низкого и высокого пространственного разрешения) (Dierking, 2013b; Steffen, Schweiger, 1990; Zabolotskikh et al., 2021), а также восстанавливать не один, а целый ряд параметров ледяного покрова (Comiso et al., 2003).

Восстановление параметров ледяного покрова по данным спутниковых радиометров

Сплочённость и типы льда

Данные измерений спутниковых микроволновых радиометров представляются на сегодняшний день единственным источником для построения карт сплочённости морского льда SIC. Пространственное разрешение результирующих полей SIC зависит от частоты каналов измерений, используемых в алгоритмах. Обзоры работ, посвящённых методам и алгоритмам восстановления сплочённости морского льда Арктики по данным спутниковых микроволновых радиометров, представлены в том или ином виде в большом количестве исследований (Заболотских, 2019; Океанография..., 2011; Смирнов и др., 2011; Тихонов и др., 2015, 2016; Шалина, Бобылев, 2017; Comiso, 2014; Ivanova et al., 2014). Большой обзор таких методов вместе с анализом погрешностей и их причин дан в работе (Заболотских, 2019), и здесь мы лишь перечислим основные положения, по которым различаются методы восстановления SIC.

Алгоритмы наиболее многочисленной группы используют кластерный анализ поляризационных и градиентных соотношений (*англ.* Polarization Ratio — PR и *англ.* Gradient Ratio — GR соответственно) для радиояростной температуры ($T_{\text{я}}$) микроволнового излучения на разных частотах в двумерном или трёхмерном пространстве (Тихонов и др., 2013, 2015; Comiso, 1986; Markus, Cavalieri, 2000; Pedersen, 1998; Shokr et al., 2008; Smith, 1996). В их основе лежит формирование кластеров измерений над морской водой и морским льдом. Эти кластеры GR, PR формируются на основе либо спутниковых измерений, либо расчётных значений $T_{\text{я}}$. При этом расчёты $T_{\text{я}}$ проводятся для системы «морской лёд — морская вода — атмосфера» на основе использования той или иной радиационно-метеорологической модели и заданных (рассчитанных по модели) диапазонов коэффициентов излучения льда и воды (точек привязки — *англ.* tie points). Иногда одновременно восстанавливают значения частной сплочённости однолетнего и многолетнего льда, когда функции плотности распределения tie points разных типов льда разнесены в пространстве. Использование вместо фиксированных tie points их множеств (кластеров) позволяет снизить ошибки восстановления SIC. В процессе разработки кластерных алгоритмов восстановления SIC при создании кластеров на основе результатов численного моделирования обычно используется ограниченный набор профилей атмосферных метеорологических параметров и параметров морского льда и океана, что приводит к дополнительным ошибкам при применении алгоритмов. Алгоритмы данной группы

обладают высокой точностью при высоких значениях сплочённости льда. Однако точность эта обеспечивается главным образом за счёт того, что всем значениям SIC, превышающим 100 %, просто присваивается значение 100 % (Shokr et al., 2008).

Алгоритмы второй группы объединяют методы, основанные на использовании точек привязки для T_y разных типов морского льда (Cavalieri et al., 1984; Comiso, 1986; Kern, Heygster, 2001; Ramseier, 1991; Svendsen et al., 1983; Swift et al., 1985). Именно эти алгоритмы позволяют определять тип льда (однолетний, *англ.* First Year Ice — FYI, и многолетний, *англ.* Multi Year Ice — MYI) вместе с его частной сплочённостью. При расчёте T_y часто используются подходы, направленные на повышение точности, такие как: а) атмосферная коррекция с использованием результатов расчёта по атмосферным моделям (Svendsen et al., 1983; Swift et al., 1985), б) использование динамических точек привязки (Kern, Heygster, 2001). Алгоритмы данной группы часто адаптируются в региональные методы, отличающиеся высокой точностью за счёт более узкого диапазона значений точек привязки для конкретных региональных условий. Применение глобальных алгоритмов при прочих равных условиях всегда ведёт к увеличению погрешностей восстановления как общей, так и частных сплочённостей морского льда.

Отдельно можно выделить методы, восстанавливающие SIC из поляризационной разницы (*англ.* Polarization Difference — PD) в измерениях на частотных каналах W-диапазона (85–90 Гц). Эти методы используют существенно более низкую степень поляризованности излучения морского льда по сравнению с излучением морской воды (Kaleschke et al., 2001; Spreen et al., 2008; Svendsen et al., 1987). Результатами применения этих методов становятся карты морского льда повышенного пространственного разрешения (Заболотских и др., 2019). Для уменьшения погрешностей восстановления, возникающих в условиях оптически плотных атмосфер или в штормовых условиях, используются так называемые атмосферные фильтры, основанные на измерениях на частотах C-, X-, Ku- и Ka-диапазона (Заболотских, Шапрон, 2019). Использование атмосферных фильтров ухудшает пространственное разрешение результирующих карт ледяного покрова. Точки привязки в алгоритмах данной группы представляют собой значения PD для морской воды и морского льда. Несмотря на то, что методы данной группы традиционно применяются к измерениям на каналах W-диапазона, в работе (Заболотских и др., 2022б) проанализированы значения PD на более низких частотах и показано, что даже измерения PD на частотах C- и X-диапазона могут быть использованы при восстановлении SIC. Этот вывод существенно расширяет возможности использования данных, например российского микроволнового сканера-зондировщика МТВЗА-ГЯ (модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы, ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002)). Более того, в работе (Заболотских и др., 2022б) показано, что использование в алгоритмах восстановления SIC значений PD на частотах C- и X-диапазона позволяет избежать недооценки сплочённости традиционными алгоритмами, основанными на измерениях вблизи 90 ГГц.

Низкая точность алгоритмов восстановления SIC при определённых условиях ставит исследователей перед необходимостью комбинировать разные подходы и создавать гибридные алгоритмы (Ivanova et al., 2015; Tonboe, Lavelle, 2016). Как правило, один из подходов в подобных методах имеет низкую чувствительность к повышенным значениям атмосферных параметров влагосодержания над морской водой, а другой обеспечивает высокую точность для областей высоких значений SIC. Сравнение результатов работы 30 алгоритмов с данными наземных наблюдений в исследовании (Ivanova et al., 2015) показало, что комбинация методов CalVal (Ramseier, 1991) и Bristol (Smith, 1996) представляется оптимальной, обеспечивающей наименьшую погрешность восстановления SIC в разных условиях и районах Арктики. Алгоритм Bristol применяется при высоких значениях SIC, и его погрешности связаны с изменчивостью свойств поверхности. Алгоритм CalVal применяется при низких значениях SIC и обладает невысокой чувствительностью к повышенным значениям параметров влагосодержания атмосферы и скорости приводного ветра. При этом использование обоих алгоритмов для максимальной эффективности требует динамических точек привязки и коррекции атмосферы.

Температура льда

Температура морского льда T_{si} представляет собой важный климатический параметр. Точность её определения зависит как от толщины морского льда, так и от высоты и свойств снежного покрова. Регистрируемый сигнал ($T_{я}$ микроволнового излучения элемента поверхности) зависит от эффективного коэффициента излучения льда χ_{sl} и воды χ_w , а также от величины SIC. Поэтому при восстановлении T_{si} используются измерения на тех частотах, на которых диапазон изменчивости χ_{sl} минимален (частоты С-диапазона). При этом используются значения SIC, восстановленные тем или иным методом (см. предыдущий подраздел) (Comiso et al., 2003). На частоте 6,9 ГГц χ_{sl} близок к 0,95 и изменчивость его составляет порядка 0,02, что даёт возможность восстанавливать T_{si} .

Температура морского льда T_{si} , полученная из измерений $T_{я}$ на канале 6,9 ГГц вертикальной поляризации, представляет собой физическую температуру верхнего слоя морского льда, который излучает большую часть радиации на данной частоте. Для однолетнего льда эта температура соответствует температуре на границе снег/лёд, потому что на данной частоте сухой снег прозрачен для излучения, а поверхность льда непрозрачна из-за высокой солёности. Для многолетнего льда температура представляет собой средневзвешенную температуру слоя льда, толщина которого зависит от его возраста (солёности).

Зарубежные центры обработки данных, такие как Национальный центр данных по исследованию снега и льда США (*англ.* National Snow and Ice Data Center — NSIDC) (<http://nsidc.org/>), японская служба поддержки пользователей JAXA GCOM-W1 Data Providing Service (<http://gcom-w1.jaxa.jp/>), Европейская межправительственная организация спутниковой метеорологии (*англ.* European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites — EUMETSAT), через свое подразделение OSI SAF (*англ.* Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility, <http://www.osi-saf.org/>) распространяют спутниковые продукты по T_{si} всегда одновременно с продуктами по SIC. При этом температура льда считается вспомогательным восстанавливаемым параметром, верификация которого затруднена, поскольку температура поверхности, оцениваемая по данным инфракрасных радиометров (например, AVHRR (*англ.* Advanced Very-High-Resolution Radiometer) и MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)), соответствует температуре верхнего слоя снежного покрова (Key, Naefliger, 1992).

Толщина льда

Толщина льда d — один из самых сложных параметров ледяного покрова для восстановления по данным спутниковых измерений. Первые спутниковые измерения толщины льда были проведены с использованием радиолокационных альтиметров на европейских спутниках дистанционного зондирования ERS-1, -2 (*англ.* Earth Observing System) (Laxon et al., 2003). С 2003 по 2009 г. регулярные данные по толщине льда обеспечивались измерениями лазерного альтиметра ICESat (*англ.* Ice, Cloud, and land Elevation Satellite) (Kwok, Cunningham, 2008), а с 2011 г. — радиоальтиметром CryoSat-2 (Laxon et al., 2013). Методы восстановления d по данным измерений, радаров-альтиметров и лазерных альтиметров для льда толщиной менее 1 м обладают очень большими погрешностями, превышающими значения климатической неопределённости d , и используются главным образом для оценки d толстых льдов. Временное разрешение карт толщины льда по данным альтиметрических измерений составляет примерно один месяц, пространственное разрешение — 25–100 км.

Существуют также исследования, в которых обсуждается возможность восстановления толщины тонких (до 50 см) льдов по данным ИК-радиометров в безоблачных условиях (Mäkynen et al., 2013). Такое восстановление возможно на основе решения уравнения баланса энергии на границе лёд/снег, данных по температуре льда и параметрам снежного покрова (температуры и толщины). И поскольку большинство необходимых параметров известны с высокой степенью неопределённости, эти методы не получили реального практического

применения в виде создания спутниковых продуктов по толщине льда. Имплементация методов в региональных исследованиях свидетельствует о высоких погрешностях оценки d (Rudjord et al., 2022).

Попытки использовать данные спутниковых микроволновых радиометров для оценки толщины молодого льда ($d \approx 10\text{--}20$ см) предпринимались неоднократно, начиная с запуска таких инструментов, как SSM/I (*англ.* Special Sensor Microwave Imager) в 1987 г. и AMSR-E (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System) в 2002 г. (Martin et al., 2005; Nihashi et al., 2009; Singh et al., 2011; Tamura et al., 2007). Для микроволновых радиометров SSM/I и серий AMSR возможность восстанавливать толщину льда обусловлена корреляцией между диэлектрическими свойствами поверхностного слоя льда и его возрастом (Naoki et al., 2008). Уменьшение солёности льда в его поверхностном слое вследствие вытекания рассола приводит к тому, что диэлектрические свойства льда становятся функцией его толщины. Поэтому коэффициент излучения льда и его радиояркость температура коррелируют с возрастом льда. Эта зависимость наиболее выражена на горизонтальной поляризации и для низких частот (С- и Х-диапазона). Методы восстановления толщины тонкого льда представляют собой уравнения линейной или экспоненциальной регрессии между поляризационными отношениями (PR) и значениями толщины льда, полученными с помощью альтернативных измерений (например, по данным спектральных радиометров AVHRR и MODIS). Точность таких методов не превышает точности ИК-методов. В работе (Nihashi et al., 2009) показано, что если лёд покрыт снежным покровом, то параметр PR на частоте 37 ГГц не чувствителен к толщине льда. Анализ данных измерений судовых радиометров на частотах 19, 37 и 85 ГГц над различными типами тонкого льда подтверждает справедливость этого ограничения (Hwang et al., 2007).

Глубина формирования излучения морского льда для частот измерений радиометров SSM/I и AMSR составляет от нескольких миллиметров (на каналах вблизи 90 ГГц) до нескольких сантиметров (на каналах С-диапазона). Это означает, что кроме изменения диэлектрических свойств верхнего слоя льда с возрастом (толщиной) не существует физических оснований для оценки толщины морского льда по измерениям на данных частотах. Именно поэтому применение регрессионных методов восстановления d тонких льдов по данным радиометров SSM/I и серий AMSR сопровождается существенными погрешностями. И несмотря на то, что время от времени в научной литературе появляются работы, демонстрирующие высокую точность восстановления d по данным спутниковых микроволновых радиометров с использованием продвинутых методов машинного обучения (Chi, Kim, 2021), к таким работам следует относиться в высшей степени критически.

Запуск Европейским космическим агентством (*англ.* European Space Agency — ESA) в 2009 г. одноканального микроволнового радиометра SMOS (*англ.* Soil Moisture and Ocean Salinity), принимающего микроволновое излучение на частоте 1,4 ГГц (L-диапазон), положил начало новой эре возможностей в области восстановления толщины морского льда по данным спутниковых микроволновых радиометров (Kaleschke et al., 2010, 2012). Глубина формирования излучения в L-диапазоне составляет несколько десятков сантиметров, поэтому измерения SMOS могут быть использованы для определения d тонких льдов. Самые простые алгоритмы восстановления d предполагают фиксированные значения температуры воды и поверхностного слоя ледяного покрова и экспоненциальное затухание $T_{\text{я}}$ с толщиной (Tian-Kunze et al., 2014). Такие алгоритмы не требуют дополнительных данных для своей реализации. Более сложные алгоритмы учитывают изменчивость как температуры льда, так и его солёности, а также пространственную неоднородность толщины ледяного покрова в пределах элемента разрешения радиометра (от 30 до 50 км) (Kaleschke et al., 2012). В отличие от алгоритмов восстановления d по данным многоканальных радиометров, работающих на частотах от С-диапазона и выше, методы оценки d по измерениям SMOS нашли практическое применение при создании геофизических продуктов по толщине тонких льдов. Крупнейшие центры спутниковых данных по параметрам арктического морского льда (NSIDC, OSI SAF, Университет Бремена (*нем.* Universität Bremen, *англ.* University of Bremen)) создают и распространяют эти продукты на регулярной оперативной основе. Следует, однако, помнить, что,

несмотря на то что зачастую эти продукты содержат значения толщины льда, превышающие 50 см, погрешность оценки $d > 50$ см растёт с толщиной по экспоненциальному закону.

Восстановление параметров ледяного покрова по данным спутниковых скаттерометров

Граница ледяного покрова (классификация морской поверхности по типу лёд/вода по данным скаттерометрических измерений)

Восстановление сплочённости льда по данным спутниковых микроволновых радиометров позволяет определять границы ледяного покрова (*англ.* Sea Ice Extent — SIE) — площадь поверхности, занятую морским льдом любой сплочённости SIC > 15 %, и его площадь (*англ.* Sea Ice Area — SIA) — площадь поверхности, занятую сплочённым морским льдом с SIC = 100 %. Именно многолетние наблюдения за SIE и SIA позволяют оценивать климатические тенденции и тренды. Восстановление SIE на сегодняшний день возможно не только на основе пассивных микроволновых измерений, но также на основе радиолокационных измерений. Регулярные радиолокационные данные обеспечивают измерения спутниковых скаттерометров (Long, 2016). Скаттерометры измеряют обратное микроволновое рассеяние σ^0 , и зависимость σ^0 от угла наблюдения существенно различна для морской воды и морского льда. Эти различия дают возможность восстанавливать границы ледяного покрова (Rivas, Stoffelen, 2011; Rivas et al., 2012; Yueh et al., 1997). Долгое время считалось, что измерения скаттерометров не позволяют восстанавливать сплочённость льда SIC, но при этом они менее чувствительны как к атмосфере (Gray et al., 1982; Meier, Stroeve, 2008), так и к наличию снежиц на поверхности льда (Rivas et al., 2018).

Скаттерометры AMI (*англ.* Active Microwave Instrument) на спутниках ERS-1, -2 и ASCAT на спутниках MetOp-A, -B, -C (*англ.* Meteorological Operational satellite programme) измеряют вертикально поляризованный сигнал обратного рассеяния на частоте С-диапазона. Измерения AMI были впервые использованы для классификации поверхности по типу морской лёд/морская вода в 1994 г. (Gohin, Cavanie, 1994) на основе разной зависимости $\sigma^0(\varphi, \theta)$ для этих двух типов поверхности. Методы определения SIE по значениям σ^0 требуют применения специальных подходов и задания (экспериментального или модельного) ГМФ льда и воды (Breivik et al., 2012). Из-за больших зон перекрытий ГМФ льда и воды в пространстве углов для повышения точности классификации (определения SIA) часто дополнительно используют измерения спутниковых микроволновых радиометров. Такое синергетическое использование активных и пассивных микроволновых измерений повышает вероятность корректной классификации. Например, байесовская классификация на основе модельных ГМФ и мультисенсорного анализа измерений ASCAT и SSM/I используется на оперативной основе в OSI SAF (Aaboe et al., 2021). Байесовская классификация только по данным скаттерометров SeaWinds и ASCAT на основе экспериментальных ГМФ льда и воды используется в исследованиях (Rivas, Stoffelen, 2011; Rivas et al., 2012). Сопоставление результатов определения SIE со снимками высокого разрешения подтвердило эффективность байесовской классификации.

В работе (Заболотских и др., 2022a) предложен новый подход для восстановления SIE по данным ASCAT, основанный на анализе среднеквадратичного отклонения ($\Delta\sigma^0$) функции $\sigma^0(\theta)$ от аппроксимирующей линейной прямой. Впервые возможность использования $\Delta\sigma^0$ для классификации морской поверхности по скаттерометрическим измерениям обсуждается в исследовании (Муртазин и др., 2015). Этот подход позволяет не только классифицировать поверхность по типу лёд/вода, но и определять сплочённость льда.

При определённых ветровых условиях ГМФ льда и воды становятся практически идентичны. Большие области пересечения $\sigma^0(\varphi, \theta)$ морского льда и морской воды приводят к существенным погрешностям классификации. Скаттерометры, работающие на двух поляризациях в Ku-диапазоне (NSCAT (*англ.* NASA Scatterometer (NASA — National Aeronautics and

Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства — НАСА)) на спутнике ADEOS-1 (*англ.* Advanced Earth Observing Satellite), QuikSCAT (*англ.* Quick Scatterometer) на спутнике SeaWinds, OSCAT (*англ.* Oceansat-2 Scatterometer) на спутнике OceanSAT-II, SCAT на спутнике HY-2A (HaiYang, *кит.* 文洋, «океан») и CSCAT (*англ.* CFOSAT SCATterometer) на спутнике CFOSAT (*англ.* Chinese-French Oceanic Satellite)), позволяют при классификации типа морской поверхности использовать различия в измерениях на вертикально-вертикальной (VV) $\left\{\sigma_{VV}^0\right\}$ и горизонтально-горизонтальной (HH) $\left\{\sigma_{HH}^0\right\}$ поляризации. Например, в алгоритме Remund/Long-NSCAT (RL-N) при определении SIE используются не только значения σ_{VV}^0 (или σ_{HH}^0), но и значения $\sigma_{VV}^0/\sigma_{HH}^0$ (Hill, Long, 2016; Remund, Long, 1999, 2013). Существуют и другие методы классификации, основанные на поляризационных измерениях в Ku-диапазоне и использующие разные комбинации σ_{HH}^0 , σ_{VV}^0 и $\sigma_{VV}^0/\sigma_{HH}^0$ (Li et al., 2016; Zhai et al., 2021). Классификация типа поверхности на основе двух поляризационных радиолокационных измерений в Ku-диапазоне отличается существенно большей точностью, чем любая классификация, основанная на однополяризационных измерениях (Zhang et al., 2021).

Типы (возрастной состав) льда

Рассеяние радиолокационного сигнала морским льдом определяется диэлектрической проницаемостью поверхности льда, шероховатостью и наличием объёмных рассеивателей (воздушные и соляные пузырьки, кристаллы снежного покрова) (Ulaby et al., 1981). Основная причина различий между σ^0 многолетнего и однолетнего морских льдов $\left\{\sigma_{MYI}^0\right\}$ и $\left\{\sigma_{FYI}^0\right\}$ лежит в увеличении объёмного рассеяния льда, пережившего период летнего таяния, за счёт уменьшения солёности верхнего слоя льда и более глубокого проникновения сигнала в его толщу. Разделение льда на FYI и MYI осложняется наличием многочисленных областей повышенной шероховатости вследствие локальных деформаций льда и образования торосистых зон (Заболотских и др., 2020а). На сегодняшний день разделение между FYI и MYI по данным радиолокационных измерений проводится на основе фиксированного порога для σ^0 , определяемого при анализе гистограмм σ^0 для стабильных зимних условий (Kwok, 2004). Недостаток такого подхода — сезонная изменчивость σ^0 и чувствительность σ^0 к деформированному однолетнему льду (Rivas et al., 2018).

В работе (Костылев и др., 2019) проведён статистический анализ значений σ^0 для нескольких основных типов льда на основе сопоставления данных измерений ASCAT с ледовыми картами Арктического и антарктического научно-исследовательского института. На основе анализа функций плотности распределения σ^0 (*англ.* Probability Distribution Function — PDF) для отдельных типов льда показано, что однозначное определение типа льда лишь по значениям σ^0 не представляется возможным из-за наличия больших зон перекрытий PDF.

В работе (Swan, Long, 2012) для классификации MYI и FYI по данным QuikSCAT за период с 2002 по 2009 г. были использованы динамические значения порогов, зависящие от времени года. Созданный спутниковый продукт по типам морского льда был расширен до 2014 г. на основе данных OSCAT и с использованием аналогичного подхода (Lindell, Long, 2015). Тенденция уменьшения площади арктического многолетнего льда, диагностируемая по данным спутниковых скаттерометров, подтверждается и работами, основанными на определении типов льда по данным спутниковых микроволновых радиометров. Так, в исследовании (Comiso, 2012) измерения AMSR-E использованы для обнаружения существенного десятилетнего снижения площади многолетнего льда в Арктике в течение 1979–2011 гг.

Совместное использование данных радиометрических и скаттерометрических измерений позволяет существенно повысить точность классификации типа льда. Так, оперативный алгоритм ECICE (*англ.* Environment Canada Ice Concentration Extractor) восстановления частной сплочённости MYI и FYI использует как данные AMSR-E, так и данные QuikSCAT (Shokr et al., 2008). Этот алгоритм был применён для построения карт сплочённости многолетнего

льда за период 2003–2009 гг. (Ye et al., 2016). Ежедневные данные по классификации морского льда по типам для зим с 2010 по 2014 г. созданы с использованием байесовского классификатора на основе данных ASCAT и SSMI/S (*англ.* Special Sensor Microwave Imager/Sounder) (Lindell, Long, 2016).

Диагностика типа льда по данным скаттерометров точнее в условиях разреженного льда и в период летнего таяния (Meier et al., 2015). В то же время, как показано в работе (Aaboe et al., 2016), преимущества использования скаттерометрических данных в условиях разреженного льда и в период летнего таяния при таком синергетическом подходе уменьшаются. До сравнительно недавнего времени регулярные измерения σ^0 низкого разрешения использовались лишь для классификации морского льда по типу однолетний/многолетний. В работе (Rivas et al., 2018) продемонстрирована возможность выделения двухлетнего льда. Подобное выделение позволило обнаружить преобладание льда двухлетнего возраста среди многолетних льдов после исторического минимума морского льда в 2007 г. и предоставить новое свидетельство исчезновения многолетнего льда в Арктике. Соответствие между результатами классификации льда (однолетний, двухлетний и многолетний) по данным ASCAT и данными по толщине льда, полученным на основе использования альтиметрических измерений CryoSat, позволяют предположить возможность использования данных ASCAT для оценки толщины льда в Арктике.

Классификация морской поверхности по данным РСА

Эпоха активного использования высокоразрешающей радиолокационной аппаратуры для изучения морского льда Арктики началась с запуска Европейским космическим агентством спутников ERS-1, -2 (в 1991 и 1995 гг.). Изображения РСА с этих спутников успешно использовались для мониторинга состояния морского льда в морях Арктики, ледового картирования и разработки маршрутов при планировании движения судов во льдах. Однако широкое использование данных РСА было ограничено узкой полосой обзора и пространственным охватом до 82° с. ш. Коммерческий спутник RadarSat-1, запущенный в 1995 г. Канадским космическим агентством (*англ.* Canadian Space Agency — CSA), обеспечил получение снимков РСА в разных режимах (под разными углами наблюдений, с разными пространственным разрешением и шириной полосы обзора). Регулярные снимки RadarSat-1 с разрешением 100 м в полосе обзора шириной до 500 км использовались для ледового картирования такими региональными агентствами по мониторингу льда, как Национальный ледовый центр США (*англ.* National Ice Center — NIC) и Канадская ледовая служба (*англ.* Canadian Ice Service — CIS) (Ramsay et al., 1998).

Запуск спутника EnviSat (*англ.* Environmental Satellite) в 2002 г. с РСА-аппаратурой ASAR (*англ.* Advanced Synthetic Aperture Radar), обеспечивающей съёмку в разных поляризационных режимах, позволил проанализировать сигнатуры поляриметрического рассеяния различных типов морского льда и морской воды под разными углами наблюдений. РСА-данные спутников RadarSat-2 (с 2007 г.), TerraSAR-X (*англ.* Synthetic Aperture Radar, X-band) (с 2007 г.) и TanDEM-X (от *англ.* TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement) (с 2010 г.), ALOS-2 (*англ.* Advanced Land Observing Satellite) (с 2014 г.) обеспечили исследователей большим количеством мультиполяризационных изображений для высокоразрешающего картирования ледяного покрова. С помощью этих изображений была продемонстрирована высокая эффективность использования мультиполяризационных данных при разделении морского льда и морской воды (Scheuchl et al., 2004a). В 2014 г. ESA запустило спутник Sentinel-1A с аппаратурой РСА, обеспечивающей получение калиброванных кополяризационных (в режиме VV или HH) снимков С-диапазона, распространяемых на свободной основе. С 2016 г. к этим данным добавились изображения Sentinel-1B.

Радиолокационные данные высокого пространственного разрешения играют большую роль при мониторинге характеристик морского льда в условиях облачности. Несмотря на то, что основным источником информации для построения оперативных ледовых карт остаются

снимки в видимом и инфракрасном диапазоне, при их отсутствии радиолокационные изображения позволяют (при определённой квалификации ледового эксперта) определять точное положение кромки льда и его тип (возраст), влияющий на уровень сложности морского судоходства. Для маршрутизации судов крайне важны и такие параметры ледяного покрова, как наличие полыней и разломов, трещин, торосов, зон пониженной сплочённости и плавающих льдин, хорошо идентифицируемых на снимках РСА. Для эффективного использования все эти навигационно-значимые параметры должны поступать в центры принятия решений в режиме, близком к реальному времени (Смирнов и др., 2010). С запуском Sentinel-1, данные которого становятся доступны уже через час после съёмки, создание ледовых карт в условиях облачности для тех районов, которые покрываются снимками (к сожалению, большинство морей российской Арктики в них не входит), существенно упростилось.

Классификация изображений РСА не представляется однозначной даже для человеческого глаза. Если оптические изображения за счёт разницы между альбедо льда и воды позволяют однозначно разделять лёд и воду, то проявления льда и воды на кополяризационных изображениях РСА при определённых ветровых условиях могут выглядеть очень похоже (Dierking, 2013a). И лишь специальные подходы дают возможность классифицировать изображения РСА по типу лёд/вода (Kwok et al., 1992). В то же время высокое пространственное разрешение РСА позволяет выделять значительно большее количество типов (возрастных градаций) льда, чем при использовании радиолокационных данных низкого разрешения (скаттерометров, радаров). Основанием для возможности классификации данных РСА по возрастным градациям служат не столько различия в уровне сигнала σ^0 , сколько различия в текстурных особенностях изображений, связанных с разным количеством трещин, торосов разного масштаба, наслоений и других видов деформации льда, влияющих на результирующее обратное рассеяние радиолокационного сигнала.

Классификация морской поверхности по типу лёд/вода на основе кополяризационных изображений РСА (аппаратура ERS-1, 2, Sentinel-1, -2) представляет собой непростую задачу, над решением которой работают научные коллективы в нашей стране и за рубежом (Захваткина и др., 2020; Park et al., 2020). Хорошо калиброванные кроссполяризационные измерения (EnviSat и RadarSat-2) сигнала обратного рассеяния более независимы от ветровой изменчивости шероховатости поверхности и поэтому существенно более пригодны для такой классификации (Dierking, 2013a). Совместное использование ко- и кроссполяризационных измерений не только позволяет уверенно разделять лёд и воду за счёт высокого контраста между σ^0 независимо от ветра, но и уменьшает зависимость σ^0 морской воды от ветра при штормовых ветрах (Komafov, Buehner, 2020; Liu et al., 2014).

Многочисленные исследования показали, что при наличии мультиполяризационных измерений отношения сигналов на ко- и кроссполяризации могут быть использованы для более эффективной классификации, чем сами сигналы (Collins et al., 1997; Nakamura et al., 2005; Ressel et al., 2016). Так, в работе (Nakamura et al., 2005) предложен метод поляриметрической декомпозиции для классификации морского льда Охотского моря на основе многополяризационных (HH и VV) двухчастотных (L- и X-диапазон) измерений РСА. Использование отношения сигналов обратного рассеяния VV/HH обеспечивает наилучшие возможности для классификации морского льда по возрасту. Предложенный в работе (Nakamura et al., 2006) алгоритм восстановления возраста морского льда с помощью σ^0 основан на эмпирическом методе интегральных уравнений и модели поверхностного рассеяния. Эффективность алгоритма подтверждена хорошими результатами сопоставления с данными натурных измерений при использовании снимков L-диапазона и несколько худшими при использовании снимков C-диапазона. Анализ данных РСА с двойной поляризацией демонстрирует возможность создания эффективных простых классификаторов на основе статистических пороговых значений на кополяризационное отношение $R = \sigma_{VV}^0 / \sigma_{HH}^0$ для стабильных зимних условий. Значения R свободной ото льда морской поверхности однозначно отличны от R практически всех типов льда (ровный однолетний, шероховатый однолетний, многолетний), кроме тонкого льда. Поэтому с использованием порогового значения на R идентификация льда возможна с точностью, близкой к 100 % (Geldsetzer, Yackel, 2009). Преимущества использования снимков

RadarSat-2 для автоматической классификации изображений по типу лёд/вода на основе алгоритмов сегментации без обучения обсуждаются в работе (Yu et al., 2012).

Существует огромное количество алгоритмов автоматической классификации мультиполяризационных снимков PCA, основанных на разных математических подходах и использующих разные комбинации сигналов (Bogdanov, 2008; Dabboor, Shokr, 2012; Geldsetzer, Yackel, 2009; Komarov, Buehner, 2020; Leigh et al., 2014; Nakamura et al., 2006; Ressel et al., 2015). Подробный обзор некоторых из них представлен, например, в работе (Zakhvatkina et al., 2019). Однако возможности оперативного использования мультиполяризационных измерений PCA RadarSat-2 для картирования характеристик ледяного покрова ограничены узкой полосой обзора, а для научного сообщества ещё и стоимостью снимков.

Несмотря на наличие измерений в режиме кроссполяризации (VH и HV) у радиолокатора Sentinel-1 (TOPSAR, *англ.* Terrain Observation with Progressive Scans SAR), их практическое использование в алгоритмах классификации на основе методик, разработанных для RadarSat-2 (Leigh et al., 2014; Liu et al., 2014; Zakhvatkina et al., 2017), ограничено из-за высокого уровня термического шума, искажающего текстуру изображения (Park et al., 2020). Несмотря на то, что ESA предоставляет данные для коррекции термического шума, после коррекции вклад остаточного шума остаётся значительным с учётом относительно узкого распределения обратного рассеяния на кроссполяризованном канале. В ряде работ использование данных Sentinel-1 для классификации морской поверхности по типу лёд/вода связывают именно с повышением эффективности алгоритмов шумоподавления на кроссполяризованных каналах (Park et al., 2017, 2019, 2020).

Резюмируя возможности данных PCA в разных частотных диапазонах и в разных поляризационных режимах по классификации морской поверхности, можно сформулировать несколько следующих положений:

1. Измерения в С-диапазоне лучше всего подходят для классификации морского льда по типу однолетний/многолетний (Microwave..., 1992).
2. Разница в использовании кополяризационных режимов HH или VV при классификации морской поверхности незначительна, хотя использование режима HH предпочтительнее из-за меньшего влияния ветрового волнения на сигнал обратного рассеяния (Partington et al., 2010).
3. Для классификации морской поверхности по типу лёд/вода кроссполяризационные измерения (HV или VH) более полезны, чем кополяризационные (HH или VV), так как они существенно менее чувствительны к ветровому волнению (Scheuchl et al., 2004b). При этом кроссполяризационные измерения нечувствительны к различным формам молодого тонкого льда.
4. Наилучшей классификационной способностью обладают хорошо калиброванные мультиполяризационные измерения с низким уровнем термического шума: отношение $\sigma_{VV}^0 / \sigma_{HH}^0$ становится оптимальной функцией для классификации морской поверхности по типу лёд/вода (Yu et al., 2012).

Большинство методов классификации основано на подходах, использующих не только значения σ^0 (или комбинации σ^0 в разных поляризационных режимах), но и текстурные особенности снимков. Авторы работы (Yu et al., 2012) провели классификацию изображения морского льда с использованием метода сегментации без обучения, включающую идентификацию кромки морского льда на основе комбинации изображений с помощью отношения $\sigma_{VV}^0 / \sigma_{HH}^0$ и вейвлет-анализа. Несмотря на продемонстрированную высокую точность, метод был применён только к одному изображению. Широко распространённый метод классификации — анализ текстурных особенностей изображения. Текстурные характеристики вычисляются на основе статистического анализа матриц совместной встречаемости (МСВ) уровней яркости (Karvonen, 2014a; Soh et al., 2004). Автоматическая классификация всегда основана, с одной стороны, на использовании одного из методов вычисления текстурных характеристик и, с другой стороны, на априори заданных моделях этих характеристик для предопределённых или непредопределённых типов поверхности (Hong, Yang, 2018). Эти модели текстурных

характеристик создаются на основе разнообразных алгоритмов настройки, включая байесовские классификаторы (Moen et al., 2013), нейронные сети (*англ.* Neural Networks — NNs) (Bogdanov, 2008; Karvonen, 2014a, b; Karvonen et al., 2005; Zakhvatkina et al., 2012), метод опорных векторов (*англ.* Support Vector Machine — SVM) (Leigh et al., 2014; Zakhvatkina et al., 2017), Марковские случайные поля (*англ.* Markov random field — MRF) (Ochilov, Clausi, 2012), метод случайного леса (*англ.* Random Forests — RF) (Han et al., 2016). В случае когда типы льда определены заранее, созданию моделей всегда предшествует создание базы снимков определённых типов льда, на которых эти модели настраиваются. Часто такие базы создаются в ручном режиме, когда присвоение элементу изображения того или иного типа проводится ледовым экспертом на основе дополнительных снимков видимого диапазона, знаний района и ретроспективы ледовой обстановки (Афанасьева и др., 2019). В последнее время появились работы, которые используют в качестве настроечной базы данных для алгоритмов автоматической классификации ледовые карты, созданные ледовыми экспертами (Park et al., 2020). С одной стороны, это резко уменьшает объём ручной работы, с другой — не избавляет от субъективно-го характера данных, используемых для создания тренировочных моделей.

Большой объективностью отличаются модели, настраиваемые при помощи алгоритмов без обучения, к которым относятся, в частности, свёрточные нейронные сети (*англ.* Convolutional Neural Networks — CNN) (Balashova et al., 2019; Boulze et al., 2020). Такие алгоритмы сами определяют количество типов поверхности на основе анализа текстурных характеристик.

Несмотря на огромное количество созданных к настоящему моменту алгоритмов классификации морской поверхности по данным РСА, их тестирование редко проводится в летних условиях. Таяние льда ведёт к существенным изменениям σ^0 вследствие изменений как шероховатости поверхности, так и её диэлектрических свойств (Johannessen et al., 2006). В работе (Lundhaug, 2002) показано, что σ^0 морского льда (особенно однолетнего и припайного) коррелирует с температурой воздуха. Учитывая зависимость σ^0 морской воды от приповерхностного ветра, авторы исследования (Hong, Yang, 2018) предложили использовать метеорологические параметры для повышения точности автоматической классификации снимков Sentinel-1 на основе метода SVM.

Многие исследователи считают, что использование только данных РСА без привлечения дополнительной информации ведёт к большим ошибкам классификации. Уменьшить эти ошибки могли бы методы, основанные на синергетическом использовании оптических снимков и снимков РСА. Однако регулярный мониторинг морского льда в высоких широтах Арктики с использованием оптических данных невозможен. Поэтому перспективным представляется совместное использование многочастотных микроволновых измерений РСА, а также повышение точности классификации за счёт дополнительных данных микроволновых радиометров (Malmgren-Hansen et al., 2020).

Заключение

Представленный обзор работ, посвящённых восстановлению параметров ледяного покрова Арктики по данным спутниковых микроволновых радиометров, скаттерометров и РСА, не охватывает несколько важнейших типов спутникового мониторинга ледяного покрова Арктики: оценки толщины льда по данным радиоальтиметров и лазерных альтиметров и восстановления дрейфа льда. Альтиметрические измерения, несмотря на регулярность, не проводятся в широкой полосе обзора, поэтому глобальные данные по толщине формируются только за счёт их временного накопления. Для оценки дрейфа льда используют анализ временной последовательности полей микроволновых измерений низкого разрешения и спутниковых снимков (как РСА, так и оптических).

К сожалению, современное состояние вопроса моделирования микроволнового сигнала системы «морская вода — морской лёд — снежный покров — атмосфера» (как коэффициента излучения χ , так и обратного рассеяния σ^0) таково, что модели существуют отдельно, а спутниковые измерения — отдельно. Это связано с тем, что данная система даже в пределах

одной возрастной категории льда отличается многообразием форм, разной шероховатостью поверхности льда, разными толщиной и параметрами снежного покрова и т. д. Практически оказывается невозможным верифицировать модели из-за отсутствия контактных измерений значимых параметров льда и снега. Это ограничивает возможности точного решения обратной задачи восстановления параметров ледяного покрова по спутниковым измерениям. Тем не менее даже имеющиеся методы позволяют с помощью спутниковых микроволновых измерений получать глобальные карты пространственного распределения характеристик морского льда на регулярной основе. Ни один отдельно рассматриваемый тип спутниковых данных не позволяет проводить высокоинформативный мониторинг состояния морского льда. Наиболее полную информацию о состоянии ледяного покрова можно получить лишь на основе синергетического анализа всех доступных данных измерений — радиометрических, скаттерометрических, РСА, оптических снимков (при их наличии и отсутствии облачности). Комплексный анализ характеристик ледяного покрова Арктики существенно облегчается при наличии возможности представления спутниковой информации в среде геосервиса. Арктический портал, разработанный в Лаборатории спутниковой океанографии Российского государственного гидрометеорологического университета, предоставляет возможность проведения комплексных исследований морского льда в Арктике на основе синергетического использования спутниковых данных разных инструментов (Заболотских и др., 2020б). Анализ временной последовательности снимков и полей геофизических параметров, восстановленных по данным микроволновых измерений, позволяет изучать разномасштабную динамику морского льда в морях Арктики и строить ледовые карты (Заболотских, Балашова, 2021).

Исследования, представленные в настоящей статье, выполнены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 19-17-00236.

Литература

1. Афанасьева Е. В., Алексеева Т. А., Соколова Ю. В., Демчев Д. М., Чуфарова М. С., Быченков Ю. Д., Девятаев О. С. Методика составления ледовых карт ААНИИ // Российская Арктика. 2019. № 7. С. 5–20. DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10071.
2. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами: пер. с англ. З. И. Фейзулина и др. М.: Мир, 1986. 664 с.
3. Заболотских Е. В. Обзор методов восстановления параметров ледяного покрова по данным спутниковых микроволновых радиометров // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 128–151. DOI: 10.31857/S0002-3515551128-151.
4. Заболотских Е. В., Балашова Е. А. Динамика морского льда в Печорском море зимой 2019/2020 // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14. № 1. С. 97–105. DOI: 10.7868/S207366732101010X.
5. Заболотских Е. В., Шапрон Б. Учет атмосферных эффектов при восстановлении сплоченности морского льда по данным спутниковых микроволновых радиометров // Метеорология и гидрология. 2019. № 2. С. 57–65.
6. Заболотских Е. В., Балашова Е. А., Шапрон Б. Усовершенствованный метод восстановления сплоченности морского льда по данным спутниковых микроволновых измерений вблизи 90 ГГц // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 233–246. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-233-243.
7. Заболотских Е. В., Хворостовский К. С., Балашова Е. А., Костылев А. И., Кудрявцев В. Н. (2020а) О возможности идентификации крупномасштабных областей восторошенного льда в Арктике по данным скаттерометра ASCAT // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 165–177. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-165-177.
8. Заболотских Е. В., Хворостовский К. С., Балашова Е. А., Азаров С. М., Кудрявцев В. Н. (2020б) Изменчивость морского льда в Арктике по данным Арктического портала // Лёд и снег. 2020. Т. 60. № 2. С. 239–250. DOI: 10.31857/S2076673420020037.
9. Заболотских Е. В., Кудрявцев В. Н., Балашова Е. А., Азаров С. М. (2022а) Новый подход для восстановления границы ледяного покрова по данным спутниковых скаттерометров ASCAT // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 193–209. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-193-209.

10. Заболотских Е. В., Балашова Е. А., Азаров С. М. (2022б) Восстановление сплочённости морского льда по данным измерений МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 27–38. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-27-38.
11. Захваткина Н. Ю., Бычкова И. А., Смирнов В. Г. Цифровая обработка данных Sentinel-1 для автоматизированного выделения кромки старых льдов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 23–34. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-23-34.
12. Костылев А. И., Заболотских Е. В., Хворостовский К. С. Исследование сезонной изменчивости значений УЭПР разных типов льда на основе данных скаттерометра ASCAT // Ученые записки Российского гос. гидрометеорол. ун-та. 2019. № 57. С. 60–76. DOI: 10.33933/2074-2762-2019-57-60-76.
13. Муртазин А. Ф., Евграфова К. Г., Кудрявцев В. Н. Применение данных скаттерометра ASCAT для исследования ледового покрова в Арктике // Ученые записки Российского гос. гидрометеорол. ун-та. 2015. № 40. С. 160–173.
14. Океанография и морской лед / ред. Фролов И. Е., Ашик И. М., Тимохов Л. А., Юлин А. В. М.: Paulsen, 2011. 432 с.
15. Смирнов В. Г., Бушуев А. В., Захваткина Н. Ю., Лоцилов В. С. Спутниковый мониторинг морских льдов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. Т. 85. № 2. С. 62–76.
16. Смирнов В. Г., Бушуев А. В., Бычкова И. А., Григорьев А. В., Захваткина Н. Ю., Лоцилов В. С., Масанов А. Д., Смирнов В. Н., Фролов С. В., Юлин А. В., Александров В. Ю. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей. СПб.: АНИИ, 2011. 240 с.
17. Тихонов В. В., Репина И. А., Алексеева Т. А., Иванов В. В., Раев М. Д., Шарков Е. А., Боярский Д. А., Комарова Н. Ю. Восстановление сплоченности ледяного покрова Арктики по данным SSM/I // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 5. С. 182–193.
18. Тихонов В. В., Раев М. Д., Шарков Е. А., Боярский Д. А., Репина И. А., Комарова Н. Ю. Мониторинг морского льда полярных регионов с использованием спутниковой микроволновой радиометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 150–169. DOI: 10.7868/S0205961416040072.
19. Тихонов В. В., Раев М. Д., Шарков Е. А., Боярский Д. А., Репина И. А., Комарова Н. Ю. Спутниковая микроволновая радиометрия морского льда полярных регионов. Обзор // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 4. С. 65–84.
20. Шалина Е. В., Бобылев Л. П. Изменение ледовых условий в Арктике согласно спутниковым наблюдениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 28–41. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-28-41.
21. Aaboe S., Breivik L.-A., Sørensen A., Eastwood S., Lavergne T. Global Sea Ice Edge and Type. Product User's Manual. OSI-403-C EUMETSAT, 2016. 61 p.
22. Aaboe S., Down E. J., Eastwood S. Product User Manual for the Global sea-ice edge and type Product. Oslo, Norway, Norwegian Meteorological Inst., 2021. 36 p.
23. Balashova E. A., Zabolotskikh E. V., Azarov S. M., Khvorostovsky K. S., Chapron B. Arctic Ocean Surface Type Classification Using SAR Images and Machine Learning Algorithms // IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS-2019). 2019. P. 10003–10006. DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8897961.
24. Bogdanov A. V. Neuroinspired architecture for robust classifier fusion of multisensor imagery // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2008. V. 46. No. 5. P. 1467–1487. DOI: 10.1109/TGRS.2008.916214.
25. Boulze H., Korosov A., Brajard J. Classification of sea ice types in Sentinel-1 SAR data using convolutional neural networks // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 13. Art. No. 2165. DOI: 10.3390/rs12132165.
26. Breivik L., Eastwood S., Lavergne T. Use of C-Band Scatterometer for Sea Ice Edge Identification // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2012. V. 50. No. 7. P. 2669–2677. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2188898.
27. Cavalieri D. J., Gloersen P., Campbell W. J. Determination of sea ice parameters with the Nimbus-7 SMMR // J. Geophysical Research: Atmospheres 1984–2012. 1984. V. 89. No. D4. P. 5355–5369. DOI: 10.1029/JD089iD04p05355.
28. 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: 0.1175/JCLI-D-12-00204.1.
29. Chi J., Kim H.-C. Retrieval of daily sea ice thickness from AMSR2 passive microwave data using ensemble convolutional neural networks // GIScience Remote Sensing. 2021. V. 58. No. 6. P. 812–830. DOI: 10.1080/15481603.2021.1943213.
30. Collins M. J., Livingstone C. E., Raney R. K. Discrimination of sea ice in the Labrador marginal ice zone from synthetic aperture radar image texture // Intern. J. Remote Sensing. 1997. V. 18. No. 3. P. 535–571.
31. Comiso J. C. Characteristics of Arctic winter sea ice from satellite multispectral microwave observations // J. Geophysical Research: Oceans. 1986. V. 91. No. C1. P. 975–994. DOI: 10.1029/JC091iC01p00975.

32. *Comiso J. C.* Large Decadal Decline of the Arctic Multiyear Ice Cover // *J. Climate*. 2012. V. 25. No. 4. P. 1176–1193. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00113.1.
33. *Comiso J. C.* Sea Ice Concentration and Extent // *Encyclopedia of Remote Sensing* / ed. Njoku E. G. N. Y.: Springer, 2014. P. 727–743. DOI: 10.1007/978-0-387-36699-9_162.
34. *Comiso J. C., Steffen K.* Studies of Antarctic sea ice concentrations from satellite data and their applications // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2001. V. 106. No. C12. P. 31361–31385. <https://doi.org/10.1029/2001JC000823>.
35. *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.
36. *Comiso J. C., Parkinson C. L., Gersten R., Stock L.* Accelerated decline in the Arctic sea ice cover // *Geophysical Research Letters*. 2008. V. 35. Art. No. L01703. DOI: 10.1029/2007GL031972.
37. *Comiso J. C., Meier W. N., Gersten R.* Variability and trends in the Arctic Sea ice cover: Results from different techniques // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2017. V. 122. No. 8. P. 6883–6900. DOI: 10.1002/2017JC012768.
38. *Dabboor M., Shokr M.* A New Bayesian Likelihood Ratio Test for Supervised Classification of Fully Polarimetric SAR Data: An Application for Sea Ice Type Mapping // *AGU Fall Meeting Abstracts*. 2012. Abstr. ID C21C-0606.
39. *Dierking W.* (2013a) Sea Ice Monitoring by Synthetic Aperture Radar // *Oceanography*. 2013. V. 26. No. 2. DOI: 10.5670/oceanog.2013.33.
40. *Dierking W.* (2013b) Sea ice classification on different spatial scales for operational and scientific use // *ESA Living Planet Symp. (ESA SP-722)*, 9–13 Sept. 2013, Edinburgh, UK. 2013. DOI: 10013/epic.44280.
41. *Drüe C., Heinemann G.* High-resolution maps of the sea-ice concentration from MODIS satellite data // *Geophysical Research Letters*. 2004. V. 31. No. 20. DOI: 10.1029/2004GL020808.
42. *Emery W. J., Radebaugh M., Fowler C. W., Cavalieri D., Steffen K.* A comparison of sea ice parameters computed from advanced very high resolution radiometer and Landsat satellite imagery and from airborne passive microwave radiometry // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1991. V. 96. No. C12. P. 22075–22085. <https://doi.org/10.1029/91JC02337>.
43. *Geldsetzer T., Yackel J. J.* Sea ice type and open water discrimination using dual co-polarized C-band SAR // *Canadian J. Remote Sensing*. 2009. V. 35. No. 1. P. 73–84. <https://doi.org/10.5589/m08-075>.
44. *Girard-Ardhuin F., Ezraty R.* Enhanced Arctic sea ice drift estimation merging radiometer and scatterometer data // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2012. V. 50. No. 7. P. 2639–2648. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2184124.
45. *Gohin F., Cavanaugh A.* A first try at identification of sea ice using the three beam scatterometer of ERS-1 // *Intern. J. Remote Sensing*. 1994. V. 15. No. 6. P. 1221–1228. DOI: 10.1080/01431169408954156.
46. *Gray A., Hawkins R., Livingstone C., Arsenault L., Johnstone W.* Simultaneous scatterometer and radiometer measurements of sea-ice microwave signatures // *IEEE J. Oceanic Engineering*. 1982. V. 7. No. 1. P. 20–32. DOI: 10.1109/JOE.1982.1145506.
47. *Grenfell T. C., Hawkins R., Livingstone C., Arsenault L., Johnstone W.* 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.
48. *Han H., Im J., Kim M., Sim S., Kim J., Kim D., Kang S.-H.* Retrieval of melt ponds on arctic multiyear sea ice in summer from TerraSAR-X dual-polarization data using machine learning approaches: A case study in the Chukchi Sea with mid-incidence angle data // *Remote Sensing*. 2016. V. 8. No. 1. Art. No. 57. DOI: 10.3390/rs8010057.
49. *Hill J. C., Long D. G.* Extension of the QuikSCAT sea ice extent data set with OSCAT data // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2016. V. 14. No. 1. P. 92–96. DOI: 10.1109/LGRS.2016.2630010.
50. *Hong D.-B., Yang C.-S.* Automatic discrimination approach of sea ice in the Arctic Ocean using Sentinel-1 Extra Wide Swath dual-polarized SAR data // *Intern. J. Remote Sensing*. 2018. V. 39. No. 13. P. 4469–4483. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1415486>.
51. *Hwang B. J., Ehn J. K., Barber D. G., Galley R., Grenfell T. C.* Investigations of newly formed sea ice in the Cape Bathurst polynya. 2. Microwave emission // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2007. V. 112. No. C5. DOI: 10.1029/2006JC003703.
52. *Ivanova N., Johannessen O. M., Pedersen L. T., Tonboe R. T.* Retrieval of Arctic Sea Ice Parameters by Satellite Passive Microwave Sensors: A Comparison of Eleven Sea Ice Concentration Algorithms // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2014. V. 52. No. 11. P. 7233–7246. DOI: 10.1109/TGRS.2014.2310136.
53. *Ivanova N., Pedersen L. T., Tonboe R. T., Kern S., Heygster G., Lavergne T., Sørensen A., Saldo R., Dybkjær G., Brucker L., Shokr M.* Satellite passive microwave measurements of sea ice concentration: An optimal algorithm and challenges // *Cryosphere*. 2015. V. 9. P. 1797–1817. DOI: 10.5194/tcd-9-1269-2015.

54. Johannessen O. M., Alexandrov V., Frolov I. Y., Sandven S., Pettersson L. H., Bobylev L. P., Kloster K., Smirnov V. G., Mironov Y. U., Babich N. G. Remote sensing of sea ice in the Northern Sea Route: studies and applications. Springer-Praxis, 2006. 472 p.
55. Kaleschke L., Lüpkes C., Vihma T., Haarpaintner J., Bochert A., Hartmann J., Heygster G. SSM/I sea ice remote sensing for mesoscale ocean-atmosphere interaction analysis // Canadian J. Remote Sensing. 2001. V. 27. No. 5. P. 526–537. <https://doi.org/10.1080/07038992.2001.10854892>.
56. Kaleschke L., Maaß N., Haas C., Hendricks S., Heygster G., Tonboe R. T. A sea-ice thickness retrieval model for 1.4 GHz radiometry and application to airborne measurements over low salinity sea-ice // The Cryosphere. 2010. V. 4. No. 4. P. 583–592. <https://doi.org/10.5194/tc-4-583-2010>.
57. Kaleschke L., Tian-Kunze X., Maaß N., Mäkynen M., Drusch M. Sea ice thickness retrieval from SMOS brightness temperatures during the Arctic freeze-up period // Geophysical Research Letters. 2012. V. 39. No. 5. Art. No. L05501. DOI: 10.1029/2012GL050916.
58. Karvonen J. (2014a) Baltic Sea ice concentration estimation based on C-band dual-polarized SAR data // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2014. V. 52. No. 9. P. 5558–5566. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2290331.
59. Karvonen J. (2014b) A sea ice concentration estimation algorithm utilizing radiometer and SAR data // The Cryosphere. 2014. V. 8. No. 5. P. 1639–1650. <https://doi.org/10.5194/tc-8-1639-2014>.
60. Karvonen J., Simila M., Mäkynen M. Open water detection from Baltic Sea ice RadarSat-1 SAR imagery // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2005. V. 2. No. 3. P. 275–279. DOI: 10.1109/LGRS.2005.847930.
61. Kern S., Heygster G. Sea-ice concentration retrieval in the Antarctic based on the SSM/I 85.5 GHz polarization // Annals of Glaciology. 2001. V. 33. No. 1. P. 109–114. <https://doi.org/10.3189/172756401781818905>.
62. Key J., Haefliger M. Arctic ice surface temperature retrieval from AVHRR thermal channels // J. Geophysical Research: Atmospheres. 1992. V. 97. No. D5. P. 5885–5893. <https://doi.org/10.1029/92JD00348>.
63. Khvorostovsky K., Rampal P. On retrieving sea ice freeboard from ICESat laser altimeter // The Cryosphere. 2016. V. 10. No. 5. P. 2329–2346. <https://doi.org/10.5194/tc-10-2329-2016>.
64. Komarov A. S., Buehner M. Ice concentration from dual-polarization SAR images using ice and water retrievals at multiple spatial scales // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2020. V. 59. No. 2. P. 950–961. DOI: 10.1109/TGRS.2020.3000672.
65. Kwok R. Annual cycles of multiyear sea ice coverage of the Arctic Ocean: 1999–2003 // J. Geophysical Research: Oceans. 2004. V. 109. No. C11. Art. No. C11004. DOI: 10.1029/2003JC002238.
66. Kwok R., Cunningham G. F. ICESat over Arctic sea ice: Estimation of snow depth and ice thickness // J. Geophysical Research: Oceans. 2008. V. 113. No. C8. Art. No. C08010. DOI: 10.1029/2008JC004753.
67. Kwok R., Rignot E., Holt B., Onstott R. Identification of sea ice types in spaceborne synthetic aperture radar data // J. Geophysical Research: Oceans. 1992. V. 97. No. C2. P. 2391–2402. DOI: 10.1029/91JC02652.
68. Laxon S., Peacock N., Smith D. High interannual variability of sea ice thickness in the Arctic region // Nature. 2003. V. 425. No. 6961. P. 947–950. DOI: 10.1038/nature02050.
69. Laxon S. W., Giles K. A., Ridout A. L., Wingham D. J., Willatt R., Cullen R., Kwok R., Schweiger A., Zhang J., Haas C. CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume // Geophysical Research Letters. 2013. V. 40. No. 4. P. 732–737. <https://doi.org/10.1002/grl.50193>.
70. Leigh S., Wang Z., Clausi D. A. Automated Ice – Water Classification Using Dual Polarization SAR Satellite Imagery // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2014. V. 52. No. 9. P. 5529–5539. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2290231.
71. Li M., Zhao C., Zhao Y., Wang Z., Shi L. Polar sea ice monitoring using HY-2A scatterometer measurements // Remote Sensing. 2016. V. 8. No. 8. Art. No. 688. DOI: 10.3390/rs8080688.
72. Lindell D. B., Long D. G. Multiyear Arctic sea ice classification using OSCAT and QuikSCAT // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2015. V. 54. No. 1. P. 167–175. DOI: 10.1109/TGRS.2015.2452215.
73. Lindell D. B., Long D. G. Multiyear Arctic ice classification using ASCAT and SSMIS // Remote Sensing. 2016. V. 8. No. 4. Art. No. 294. DOI: 10.3390/rs8040294.
74. Liu H., Guo H., Zhang L. SVM-based sea ice classification using textural features and concentration from RadarSat-2 dual-pol ScanSAR data // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2014. V. 8. No. 4. P. 1601–1613. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2365215.
75. Long D. G. Polar applications of spaceborne scatterometers // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. V. 10. No. 5. P. 2307–2320. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2629418.
76. Lundhaug M. ERS SAR studies of sea ice signatures in the Pechora Sea and Kara Sea region // Canadian J. Remote Sensing. 2002. V. 28. No. 2. P. 114–127. DOI: 10.5589/m02-022.
77. Mäkynen M., Cheng B., Similä M. On the accuracy of thin-ice thickness retrieval using MODIS thermal imagery over Arctic first-year ice // Annals of Glaciology. 2013. V. 54. No. 62. P. 87–96. <https://doi.org/10.3189/2013AoG62A166>.

78. *Malmgren-Hansen D., Pedersen L. T., Nielsen A. A., Kreiner M. B., Saldo R., Skriver H., Lavelle J., Buus-Hinkler J., Krane K. H.* A convolutional neural network architecture for Sentinel-1 and AMSR2 data fusion // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2020. V. 59. No. 3. P. 1890–1902. DOI: 10.1109/TGRS.2020.3004539.
79. *Markus T., Cavalieri D. J.* An enhancement of the NASA Team sea ice algorithm // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2000. V. 38. No. 3. P. 1387–1398. DOI: 10.1109/36.843033.
80. *Martin S., Drucker R., Kwok R., Holt B.* Improvements in the estimates of ice thickness and production in the Chukchi Sea polynyas derived from AMSR-E // *Geophysical Research Letters*. 2005. V. 32. No. 5. Art. No. L05505. DOI: 10.1029/2004GL022013.
81. *Meier W. N.* Comparison of passive microwave ice concentration algorithm retrievals with AVHRR imagery in Arctic peripheral seas // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2005. V. 43. No. 6. P. 1324–1337. DOI: 10.1109/TGRS.2005.846151.
82. *Meier W. N., Stroeve J.* Comparison of sea-ice extent and ice-edge location estimates from passive microwave and enhanced-resolution scatterometer data // *Annals of Glaciology*. 2008. V. 48. P. 65–70. DOI: 10.3189/172756408784700743.
83. *Meier W. N., Fetterer F., Stewart J. S., Helfrich S.* How do sea-ice concentrations from operational data compare with passive microwave estimates? Implications for improved model evaluations and forecasting // *Annals of Glaciology*. 2015. V. 56. No. 69. P. 332–340. <https://doi.org/10.3189/2015AoG69A694>.
84. *Microwave Remote Sensing of Sea Ice* / ed. Carsey F. D. Book Ser.: Geophysical Monograph 68. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 1992. 462 p.
85. *Moen M.-A., Doulgeris A. P., Anfinson S. N., Renner A. H., Hughes N., Gerland S., Eltoft T.* Comparison of feature based segmentation of full polarimetric SAR satellite sea ice images with manually drawn ice charts // *The Cryosphere*. 2013. V. 7. No. 6. P. 1693–1705. <https://doi.org/10.5194/tc-7-1693-2013>.
86. *Nakamura K., Wakabayashi H., Naoki K., Nishio F., Moriyama T., Uratsuka S.* Observation of sea-ice thickness in the Sea of Okhotsk by using dual-frequency and fully polarimetric airborne SAR (Pi-SAR) data // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2005. V. 43. No. 11. P. 2460–2469. DOI: 10.1109/TGRS.2005.853928.
87. *Nakamura K., Wakabayashi H., Naoki K., Nishio F.* Sea-ice thickness retrieval in the Sea of Okhotsk using dual-polarization SAR data // *Annals of Glaciology*. 2006. V. 44. P. 261–268. <https://doi.org/10.3189/172756406781811420>.
88. *Naoki K., Ukita J., Nishio F., Nakayama M., Comiso J. C., Gasiewski A.* Thin sea ice thickness as inferred from passive microwave and in situ observations // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2008. V. 113. No. C2. Art. No. C02S16. DOI: 10.1029/2007JC004270.
89. *Nihashi S., Ohshima K. I., Tamura T., Fukamachi Y., Saitoh S.* Thickness and production of sea ice in the Okhotsk Sea coastal polynyas from AMSR-E // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2009. V. 114. No. C10. Art. No. C10025. DOI: 10.1029/2008JC005222.
90. *Ochilov S., Clausi D. A.* Operational SAR sea-ice image classification // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2012. V. 50. No. 11. P. 4397–4408. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2192278.
91. *Park J.-W., Korosov A. A., Babiker M., Sandven S., Won J.-S.* Efficient thermal noise removal for Sentinel-1 TOPSAR cross-polarization channel // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2017. V. 56. No. 3. P. 1555–1565. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2765248.
92. *Park J.-W., Won J.-S., Korosov A. A., Babiker M., Miranda N.* Textural noise correction for Sentinel-1 TOPSAR cross-polarization channel images // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2019. V. 57. No. 6. P. 4040–4049. DOI: 10.1109/TGRS.2018.2889381.
93. *Park J.-W., Korosov A. A., Babiker M., Won J.-S., Hansen M. W., Kim H.-C.* Classification of sea ice types in Sentinel-1 synthetic aperture radar images // *The Cryosphere*. 2020. V. 14. No. 8. P. 2629–2645. <https://doi.org/10.5194/tc-14-2629-2020>.
94. *Partington K. C., Flach J. D., Barber D., Isleifson D., Meadows P. J., Verlaan P.* Dual-Polarization C-Band Radar Observations of Sea Ice in the Amundsen Gulf // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2010. V. 48. No. 6. P. 2685–2691. DOI: 10.1109/TGRS.2009.2039577.
95. *Pedersen L. T.* Improved spatial resolution of SSM/I products // *Development of new satellite ice data products* / ed. Sandven S. Final Rep. No. 145. Bergen, Norway: Nansen Environmental and Remote Sensing Center, 1998.
96. *Ramsay B., Manore M., Weir L., Wilson K., Bradley D.* Use of RadarSat data in the Canadian Ice Service // *Canadian J. Remote Sensing*. 1998. V. 24. No. 1. P. 36–42.
97. *Ramseier R. O.* Sea ice validation // *DMSP Special Sensor Microwave/Imager Calibration/Validation* / ed. Hollinger J. P.; Naval Research Laboratory. Washington, D. C., 1991.
98. *Remund Q. P., Long D. G.* Sea ice extent mapping using Ku-band scatterometer data // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1999. V. 104. No. C5. P. 11515–11527. DOI: 10.1029/98JC02373.
99. *Remund Q. P., Long D. G.* A decade of QuikSCAT scatterometer sea ice extent data // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2013. V. 52. No. 7. P. 4281–4290. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2281056.

100. *Ressel R., Frost A., Lehner S.* A Neural Network-Based Classification for Sea Ice Types on X-Band SAR Images // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2015. V. 8. No. 7. P. 3672–3680. DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2436993.
101. *Ressel R., Singha S., Lehner S., Rösel A., Spreen G.* Investigation into different polarimetric features for sea ice classification using X-band synthetic aperture radar // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2016. V. 9. No. 7. P. 3131–3143. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2539501.
102. *Ricker R., Hendricks S., Kaleschke L., Tian-Kunze X., King J., Haas C.* A weekly Arctic sea-ice thickness data record from merged CryoSat-2 and SMOS satellite data // *The Cryosphere*. 2017. V. 11. No. 4. P. 1607–1623. <https://doi.org/10.5194/tc-11-1607-2017>.
103. *Rinne E., Similä M.* Utilisation of CryoSat-2 SAR altimeter in operational ice charting // *The Cryosphere*. 2016. V. 10. No. 1. P. 121–131. <https://doi.org/10.5194/tc-10-121-2016>.
104. *Rivas M. B., Stoffelen A.* New Bayesian algorithm for sea ice detection with QuikSCAT // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2011. V. 49. No. 6. P. 1894–1901. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2182356.
105. *Rivas M. B., Verspeek J., Verhoef A., Stoffelen A.* Bayesian Sea Ice Detection with the Advanced Scatterometer ASCAT // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2012. V. 50. No. 7. P. 2649–2657. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2182356.
106. *Rivas M. B., Otosaka I., Stoffelen A., Verhoef A.* A scatterometer record of sea ice extents and backscatter: 1992–2016 // *The Cryosphere*. 2018. V. 12. No. 9. P. 2941–2953. <https://doi.org/10.5194/tc-12-2941-2018>.
107. *Rudjord Ø., Solberg R., Spreen G., Gerland S.* Estimating thin ice thickness around Svalbard using MODIS satellite imagery // *Geografiska Annaler: Series A. Physical Geography*. 2022. V. 104. No. 2. P. 127–149. DOI: 10.1080/04353676.2022.2070158.
108. *Scheuchl B., Caves R., Cumming I., Staples G.* Automated sea ice classification using spaceborne polarimetric SAR data // *Scanning the Present and Resolving the Future: Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS-2001)*. 2001. V. 7. Cat. No. 01CH37217. DOI: 10.1109/IGARSS.2001.978275.
109. *Scheuchl B., Caves R., Flett D., DeAbreu R., Arkett M., Cumming I.* (2004a) EnviSat ASAR AP Data for Operational Sea Ice Monitoring // *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS-2004)*. 2004. P. 2142–2145. DOI: 10.1109/IGARSS.2004.1370782.
110. *Scheuchl B., Flett D., Caves R., Cumming I.* (2004b) Potential of RadarSat-2 data for operational sea ice monitoring // *Canadian J. Remote Sensing*. 2004. V. 30. No. 3. P. 448–461. <https://doi.org/10.5589/m04-011>.
111. *Shokr M., Lambe A., Agnew T.* A new algorithm (ECICE) to estimate ice concentration from remote sensing observations: An application to 85-GHz passive microwave data // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2008. V. 46. No. 12. P. 4104–4121. DOI: 10.1109/TGRS.2008.2000624.
112. *Singh R. K., Oza S. R., Vyas N. K., Sarkar A.* Estimation of thin ice thickness from the advanced microwave scanning radiometer-EOS for coastal polynyas in the Chukchi and Beaufort Seas // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2011. V. 49. No. 8. P. 2993–2998. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2123101.
113. *Smith D. M.* Extraction of winter total sea-ice concentration in the Greenland and Barents Seas from SSM/I data // *Remote Sensing*. 1996. V. 17. No. 13. P. 2625–2646. <https://doi.org/10.1080/01431169608949096>.
114. *Soh L.-K., Tsatsoulis C., Gineris D., Bertoia C.* ARKTOS: An intelligent system for SAR sea ice image classification // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2004. V. 42. No. 1. P. 229–248. DOI: 10.1109/TGRS.2003.817819.
115. *Spreen G., Kaleschke L., Heygster G.* Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels // *J. Geophysical Research: Oceans* 1978–2012. 2008. V. 113. No. C2. Art. No. C02S03. DOI: 10.1029/2005JC003384.
116. *Steffen K., Schweiger A. J.* A multisensor approach to sea ice classification for the validation of DMSP-SSM/I passive microwave derived sea ice products // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1990. V. 56. P. 75–82.
117. *Svendsen E., Kloster K., Farrelly B., Johannessen O. M., Johannessen J. A., Campbell W. J., Gloersen P., Cavalieri D., Mätzler C.* Norwegian remote sensing experiment: Evaluation of the Nimbus-7 scanning multichannel microwave radiometer for sea ice research // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1983. V. 88. No. C5. P. 2781–2791. <https://doi.org/10.1029/JC088iC05p02781>.
118. *Svendsen E., Mätzler C., Grenfell T. C.* A model for retrieving total sea ice concentration from a spaceborne dual-polarized passive microwave instrument operating near 90 GHz // *Intern. J. Remote Sensing*. 1987. V. 8. No. 10. P. 1479–1487. <https://doi.org/10.1080/01431168708954790>.
119. *Swan A. M., Long D. G.* Multiyear Arctic sea ice classification using QuikSCAT // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2012. V. 50. No. 9. P. 3317–3326. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2184123.
120. *Swift C. T., Fedor L. S., Ramseier R. O.* An algorithm to measure sea ice concentration with microwave radiometers // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1985. V. 90. No. C1. P. 1087–1099. DOI: 10.1029/JC090iC01p01087.

121. Tamura T., Ohshima K. I., Markus T., Cavalieri D. J., Nishashi S., Hirasawa N. Estimation of thin ice thickness and detection of fast ice from SSM/I data in the Antarctic Ocean // *J. Atmospheric and Ocean Technology*. 2007. V. 24. No. 10. P. 1757–1772. <https://doi.org/10.1175/JTECH2113.1>.
122. Tian-Kunze X., Kaleschke L., Maaß N., Mäkynen M., Serra N., Drusch M., Krumpfen T. SMOS-derived thin sea ice thickness: algorithm baseline, product specifications and initial verification // *The Cryosphere*. 2014. V. 8. P. 997–1018. <https://doi.org/10.5194/tc-8-997-2014>.
123. Tonboe R., Lavelle J. The Eumetsat OSI SAF Sea Ice Concentration Algorithm: Algorithm Theoretical Basis Document. Product OSI-401-b. Version 1.5 / Ocean and Sea Ice SAF. 2016. 17 p.
124. Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K. Microwave remote sensing: Active and passive. V. 1. Microwave remote sensing fundamentals and radiometry. Reading, MA: Addison-Wesley Publ. Co., 1981. 470 p.
125. Ye Y., Shokr M., Heygster G., Spreen G. Improving multiyear sea ice concentration estimates with sea ice drift // *Remote Sensing*. 2016. V. 8. No. 5. Art. No. 397. DOI: 10.3390/rs8050397.
126. Yu P., Qin A. K., Clausi D. A. Feature extraction of dual-pol SAR imagery for sea ice image segmentation // *Canadian J. Remote Sensing*. 2012. V. 38. No. 3. P. 352–366. <https://doi.org/10.5589/m12-028>.
127. Yueh S. H., Kwok R., Lou S.-H., Tsai W.-Y. Sea ice identification using dual-polarized Ku-band scatterometer data // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1997. V. 35. No. 3. P. 560–569. DOI: 10.1109/36.581968.
128. Zabolotskikh E. V., Balashova E. A., Kudryavtsev V. N., Chapron B. Synergistic Use of Satellite Scatterometer, SAR and Altimeter Data to Study First Year Sea Ice Properties // *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS-2021)*. 2021. P. 5633–5636. DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553828.
129. Zakhvatkina N. Y., Alexandrov V. Y., Johannessen O. M., Sandven S., Frolov I. Y. Classification of sea ice types in EnviSat synthetic aperture radar images // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2012. V. 51. No. 5. P. 2587–2600. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2212445.
130. Zakhvatkina N., Korosov A., Muckenhuber S., Sandven S., Babiker M. Operational algorithm for ice – water classification on dual-polarized RADARSAT-2 images // *The Cryosphere*. 2017. V. 11. No. 1. P. 33–46. DOI: 0.5194/tc-11-33-2017.
131. Zakhvatkina N., Smirnov V., Bychkova I. Satellite SAR Data-based Sea Ice Classification: An Overview // *Geosciences*. 2019. V. 9. No. 4. Art. No. 152. DOI: 10.3390/geosciences9040152.
132. Zhai X., Wang Z., Zheng Z., Xu R., Dou F., Xu N., Zhang X. Sea Ice Monitoring with CFOSAT Scatterometer Measurements Using Random Forest Classifier // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. No. 22. Art. No. 4686. DOI: 10.3390/rs13224686.
133. Zhang Z., Yu Y., Shokr M., Li X., Ye Y., Cheng X., Chen Z., Hui F. Intercomparison of Arctic Sea Ice Backscatter and Ice Type Classification Using Ku-Band and C-Band Scatterometers // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2021. V. 60. DOI: 10.1109/TGRS.2021.3099835.
134. Zibordi G., Van Woert M., Meloni G. P., Canossi I. Intercomparisons of sea ice concentration from SSM/I and AVHRR data of the Ross Sea // *Remote Sensing of Environment*. 1995. V. 53. No. 3. P. 145–152. DOI: 10.1016/0034-4257(94)00100-2.

Satellite microwave remote sensing of the Arctic sea ice. Review

**E. V. Zabolotskikh, K. S. Khvorostovsky, M. A. Zhivotovskaya,
E. V. Lvova, S. M. Azarov, E. A. Balashova**

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

The paper presents an overview of the remote sensing methods for the Arctic sea ice cover characteristic retrieval from satellite microwave measurements. The basic physical principles of methods are described in relation to the estimation of various sea ice parameters. Both fundamental studies, aimed at the method development, and practical research studies, related to the method application, are analyzed. The review is structured in the form of sections, each of which is devoted to a particular type of instrument. Within the sections, the analysis is carried out specifically for each of the considered parameters. The issues related to the development of the methods for the retrieval of sea ice concentration (SIC), types, temperature and thickness from satellite microwave radiometer measurements are

discussed. Classification of SIC retrieval methods and an analysis of error sources is presented, as well as the limitations for the estimation of the other sea ice cover parameters from passive microwave data. The methods for the retrieval of the Arctic sea ice edge and age composition from satellite scatterometer data are considered. New possibilities for the exploration of scatterometer measurements, associated with their high temporal resolution in the polar regions, are discussed. The approaches used in the classification of the sea surface based on synthetic aperture radar (SAR) data analysis and the main classification problems related to available Sentinel-1 SAR data are analyzed.

Keywords: Arctic, sea ice cover parameters, satellite remote sensing, microwave methods, microwave radiometers, scatterometers, SAR

Accepted: 27.01.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-9-34

References

1. Afanasyeva E. V., Alekseeva T. A., Sokolova Yu. V., Demchev D. M., Chufarova M. S., Bychenkov Yu. D., Devyataev O. S., AARI methodology for sea ice charts composition, *Russian Arctic*, 2019, No. 7, pp. 5–20 (in Russian), DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10071.
2. Bohren C. F., Huffman D. R., *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, New York: Wiley Interscience, 1983, 544 p.
3. 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, pp. 110–128, DOI: 10.31857/S0002-3515551128-151.
4. Zabolotskikh E. V., Balashova E. A., Sea ice dynamics in the Pechora Sea in winter 2019/2020, *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*, 2021, Vol. 14, No. 1, pp. 97–105 (in Russian), DOI: 10.7868/S207366732101010X.
5. Zabolotskikh E. V., Chapron B., Consideration of atmospheric effects for sea ice concentration retrieval from satellite microwave observations, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2019, Vol. 44, No. 2, pp. 124–129.
6. 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, Vol. 16, No. 4, pp. 233–243 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-233-243.
7. Zabolotskikh E. V., Khvorostovsky K. S., Balashova E. A., Kostylev A. I., Kudryavtsev V. N. (2020a), Identification of large-scale sea ice ridge areas in the Arctic using ASCAT data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 165–177 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-165-177.
8. Zabolotskikh E. V., Khvorostovsky K. S., Balashova E. A., Azarov S. M., Kudryavtsev V. N. (2020b), Variability of sea ice in the Arctic according to the Arctic Portal, *Ice and Snow*, 2020, Vol. 60, No. 2, pp. 239–250 (in Russian), DOI: 10.31857/S2076673420020037.
9. Zabolotskikh E. V., Kudryavtsev V. N., Balashova E. A., Azarov S. M. (2022a), New approach to estimate sea ice edge from ASCAT data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 5, pp. 193–209 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-193-209.
10. Zabolotskikh E. V., Balashova E. A., Azarov S. M. (2022b), Sea ice concentration retrieval from MTVZA-GYa measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 1, pp. 27–38 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-27-38.
11. Zakhvatkina N. Yu., Bychkova I. A., Smirnov V. G., Digital processing of Sentinel-1 data for automated detection of old ice edge, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 5, pp. 23–34 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-23-34.
12. Kostylev A. I., Zabolotskikh E. V., Khvorostovsky K. S., Research of the seasonal variability of backscatter of different types of ice on ASCAT scatterometer data, *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2019, No. 57, pp. 60–76 (in Russian), DOI: 10.33933/2074-2762-2019-57-60-76.
13. Murtazin A. F., Evgrafova K. G., Kudryavtsev V. N., Arctic Sea ice properties using ASCAT, *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2015, No. 40, pp. 160–173 (in Russian).
14. *Okeanografiya i morskoi led* (Oceanography and sea ice), Frolov I. E., Ashik I. M., Timokhov L. A., Yulin A. V. (eds.), Moscow: Paulsen, 2011, 432 p. (in Russian).
15. Smirnov V. G., Bushuev A. V., Zakhvatkina N. Yu., Loschilov V. S., Satellite monitoring of sea ice, *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2010, Vol. 85, No. 2, pp. 62–76 (in Russian).

16. Smirnov V. G., Bushuev A. V., Bychkova I. A., Grigor'ev A. V., Zakhvatkina N. Yu., Loshchilov V. S., Masanov A. D., Smirnov V. N., Frolov S. V., Yulin A. V., Aleksandrov V. Yu., *Sputnikovye metody opredeleniya kharakteristik ledyanogo pokrova morei* (Satellite methods for determining the characteristics of the sea ice cover), Saint Petersburg: AANII, 2011, 240 p. (in Russian).
17. Tikhonov V. V., Repina I. A., Alexeeva T. A., Ivanov V. V., Raev M. D., Sharkov E. A., Boyarskii D. A., Komarova N. Yu., Arctic sea ice cover reconstruction on the basis of SSM/I data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 5, pp. 182–193 (in Russian).
18. Tikhonov V. V., Raev M. D., Sharkov E. A., Boyarskii D. A., Repina I. A., Komarova N. Yu., Polar sea ice monitoring using satellite microwave radiometer data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 150–169 (in Russian), DOI: 10.7868/SO205961416040072.
19. Tikhonov V. V., Raev M. D., Sharkov E. A., Boyarskii D. A., Repina I. A., Komarova N. Yu., Satellite microwave radiometry of the polar region sea ice. Review, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 4, pp. 65–84 (in Russian).
20. Shalina E. V., Bobylev L. P., Sea ice transformations in the Arctic from satellite observations, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 28–41 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-28-41.
21. Aaboe S., Breivik L.-A., Sørensen A., Eastwood S., Lavergne T., *Global Sea Ice Edge and Type. Product User's Manual*, OSI-403-C EUMETSAT, 2016, 61 p.
22. Aaboe S., Down E. J., Eastwood S., *Product User Manual for the Global sea-ice edge and type Product*, Oslo, Norway, Norwegian Meteorological Inst., 2021, 36 p.
23. Balashova E. A., Zabolotskikh E. V., Azarov S. M., Khvorostovsky K. S., Chapron B., Arctic Ocean Surface Type Classification Using SAR Images and Machine Learning Algorithms, *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS-2019)*, 2019, pp. 10003–10006, DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8897961.
24. Bogdanov A. V., Neuroinspired architecture for robust classifier fusion of multisensor imagery, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2008, Vol. 46, No. 5, pp. 1467–1487.
25. Boulze H., Korosov A., Brajard J., Classification of sea ice types in Sentinel-1 SAR data using convolutional neural networks, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 13, Art. No. 2165, DOI: 10.3390/rs12132165.
26. Breivik L., Eastwood S., Lavergne T., Use of C-Band Scatterometer for Sea Ice Edge Identification, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, No. 7, pp. 2669–2677, DOI: 10.1109/TGRS.2012.2188898.
27. Cavalieri D. J., Gloersen P., Campbell W. J., Determination of sea ice parameters with the Nimbus-7 SMMR, *J. Geophysical Research: Atmospheres 1984–2012*, 1984, Vol. 89, No. D4, pp. 5355–5369, DOI: 10.1029/JD089iD04p05355.
28. Chan M. A., Comiso J. C., Arctic Cloud Characteristics as Derived from MODIS, CALIPSO, and CloudSat, *J. Climate*, 2012, Vol. 26, No. 10, pp. 3285–3306, DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00204.1.
29. Chi J., Kim H.-C., Retrieval of daily sea ice thickness from AMSR2 passive microwave data using ensemble convolutional neural networks, *GIScience Remote Sensing*, 2021, Vol. 58, No. 6, pp. 812–830, DOI: 10.1080/15481603.2021.1943213.
30. Collins M. J., Livingstone C. E., Raney R. K., Discrimination of sea ice in the Labrador marginal ice zone from synthetic aperture radar image texture, *Intern. J. Remote Sensing*, 1997, Vol. 18, No. 3, pp. 535–571.
31. Comiso J. C., Characteristics of Arctic winter sea ice from satellite multispectral microwave observations, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1986, Vol. 91, No. C1, pp. 975–994, DOI: 10.1029/JC091iC01p00975.
32. Comiso J. C., Large Decadal Decline of the Arctic Multiyear Ice Cover, *J. Climate*, 2012, Vol. 25, No. 4, pp. 1176–1193, DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00113.1.
33. Comiso J. C., Sea Ice Concentration and Extent, In: *Encyclopedia of Remote Sensing*, Njoku E. G. (ed.), New York: Springer, 2014, pp. 727–743, DOI: 10.1007/978-0-387-36699-9_162.
34. Comiso J. C., Steffen K., Studies of Antarctic sea ice concentrations from satellite data and their applications, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2001, Vol. 106, No. C12, pp. 31361–31385, <https://doi.org/10.1029/2001JC000823>.
35. 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, Vol. 41, No. 2, pp. 243–252, DOI: 10.1109/TGRS.2002.808317.
36. Comiso J. C., Parkinson C. L., Gersten R., Stock L., Accelerated decline in the Arctic sea ice cover, *Geophysical Research Letters*, 2008, Vol. 35, Art. No. L01703, DOI: 10.1029/2007GL031972.
37. Comiso J. C., Meier W. N., Gersten R., Variability and trends in the Arctic Sea ice cover: Results from different techniques, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2017, Vol. 122, No. 8, pp. 6883–6900, DOI: 10.1002/2017JC012768.
38. Dabboor M., Shokr M., A New Bayesian Likelihood Ratio Test for Supervised Classification of Fully Polarimetric SAR Data: An Application for Sea Ice Type Mapping, *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2012, Abstr. ID C21C-0606.

39. Dierking W. (2013a), Sea Ice Monitoring by Synthetic Aperture Radar, *Oceanography*, 2013, Vol. 26, No. 2, DOI: 10.5670/oceanog.2013.33.
40. Dierking W. (2013b), Sea ice classification on different spatial scales for operational and scientific use, *ESA Living Planet Symp. (ESA SP-722)*, 9–13 Sept. 2013, Edinburgh, UK, 2013, DOI: 10013/epic.44280.
41. Drüe C., Heinemann G., High-resolution maps of the sea-ice concentration from MODIS satellite data, *Geophysical Research Letters*, 2004, Vol. 31, No. 20, DOI: 10.1029/2004GL020808.
42. Emery W.J., Radebaugh M., Fowler C.W., Cavalieri D., Steffen K., A comparison of sea ice parameters computed from advanced very high resolution radiometer and Landsat satellite imagery and from airborne passive microwave radiometry, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1991, Vol. 96, No. C12, pp. 22075–22085, <https://doi.org/10.1029/91JC02337>.
43. Geldsetzer T., Yackel J.J., Sea ice type and open water discrimination using dual co-polarized C-band SAR, *Canadian J. Remote Sensing*, 2009, Vol. 35, No. 1, pp. 73–84, <https://doi.org/10.5589/m08-075>.
44. Girard-Ardhuin F., Ezraty R., Enhanced Arctic sea ice drift estimation merging radiometer and scatterometer data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, No. 7, pp. 2639–2648, DOI: 10.1109/TGRS.2012.2184124.
45. Gohin F., Cavanie A., A first try at identification of sea ice using the three beam scatterometer of ERS-1, *Intern. J. Remote Sensing*, 1994, Vol. 15, No. 6, pp. 1221–1228, DOI: 10.1080/01431169408954156.
46. Gray A., Hawkins R., Livingstone C., Arsenault L., Johnstone W., Simultaneous scatterometer and radiometer measurements of sea-ice microwave signatures, *IEEE J. Oceanic Engineering*, 1982, Vol. 7, No. 1, pp. 20–32, DOI: 10.1109/JOE.1982.1145506.
47. Grenfell T.C., Hawkins R., Livingstone C., Arsenault L., Johnstone W., 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, Vol. 36, No. 5, pp. 1642–1654, DOI: 10.1109/36.718636.
48. Han H., Im J., Kim M., Sim S., Kim J., Kim D., Kang S.-H., Retrieval of melt ponds on arctic multiyear sea ice in summer from TerraSAR-X dual-polarization data using machine learning approaches: A case study in the Chukchi Sea with mid-incidence angle data, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 1, Art. No. 57, DOI: 10.3390/rs8010057.
49. Hill J.C., Long D.G., Extension of the QuikSCAT sea ice extent data set with OSCAT data, *IEEE Geosci. Remote Sensing Letters*, 2016, Vol. 14, No. 1, pp. 92–96, DOI: 10.1109/LGRS.2016.2630010.
50. Hong D.-B., Yang C.-S., Automatic discrimination approach of sea ice in the Arctic Ocean using Sentinel-1 Extra Wide Swath dual-polarized SAR data, *Intern J. Remote Sensing*, 2018, Vol. 39, No. 13, pp. 4469–4483, <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1415486>.
51. Hwang B.J., Ehn J.K., Barber D.G., Galley R., Grenfell T.C., Investigations of newly formed sea ice in the Cape Bathurst polynya: 2. Microwave emission, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2007, Vol. 112, No. C5, DOI: 10.1029/2006JC003703.
52. Ivanova N., Johannessen O.M., Pedersen L.T., Tonboe R.T., Retrieval of Arctic Sea Ice Parameters by Satellite Passive Microwave Sensors: A Comparison of Eleven Sea Ice Concentration Algorithms, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2014, Vol. 52, No. 11, pp. 7233–7246, DOI: 10.1109/TGRS.2014.2310136.
53. Ivanova N., Pedersen L.T., Tonboe R.T., Kern S., Heygster G., Lavergne T., Sørensen A., Saldo R., Dybkjær G., Brucker L., Shokr M., Satellite passive microwave measurements of sea ice concentration: An optimal algorithm and challenges, *Cryosphere*, 2015, Vol. 9, pp. 1797–1817, DOI: 10.5194/tcd-9-1269-2015.
54. Johannessen O.M., Alexandrov V., Frolov I.Y., Sandven S., Petterson L.H., Bobylev L.P., Kloster K., Smirnov V.G., Mironov Y.U., Babich N.G., *Remote sensing of sea ice in the Northern Sea Route: studies and applications*, Springer-Praxis, 2006, 472 p.
55. Kaleschke L., Lüpkes C., Vihma T., Haarpaintner J., Bochert A., Hartmann J., Heygster G., SSM/I sea ice remote sensing for mesoscale ocean-atmosphere interaction analysis, *Canadian J. Remote Sensing*, 2001, Vol. 27, No. 5, pp. 526–537, <https://doi.org/10.1080/07038992.2001.10854892>.
56. Kaleschke L., Maaß N., Haas C., Hendricks S., Heygster G., Tonboe R.T., A sea-ice thickness retrieval model for 1.4 GHz radiometry and application to airborne measurements over low salinity sea-ice, *The Cryosphere*, 2010, Vol. 4, No. 4, pp. 583–592, <https://doi.org/10.5194/tc-4-583-2010>.
57. Kaleschke L., Tian-Kunze X., Maaß N., Mäkynen M., Drusch M., Sea ice thickness retrieval from SMOS brightness temperatures during the Arctic freeze-up period, *Geophysical Research Letters*, 2012, Vol. 39, No. 5, Art. No. L05501, DOI: 10.1029/2012GL050916.
58. Karvonen J. (2014a), Baltic sea ice concentration estimation based on C-band dual-polarized SAR data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2014, Vol. 52, No. 9, pp. 5558–5566, DOI: 10.1109/TGRS.2013.2290331.
59. Karvonen J. (2014b), A sea ice concentration estimation algorithm utilizing radiometer and SAR data, *The Cryosphere*, 2014, Vol. 8, No. 5, pp. 1639–1650, <https://doi.org/10.5194/tc-8-1639-2014>.

60. Karvonen J., Simila M., Makynen M., Open water detection from Baltic Sea ice RadarSat-1 SAR imagery, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, Vol. 2, No. 3, pp. 275–279, DOI: 10.1109/LGRS.2005.847930.
61. Kern S., Heygster G., Sea-ice concentration retrieval in the Antarctic based on the SSM/I 85.5 GHz polarization, *Annals of Glaciology*, 2001, Vol. 33, No. 1, pp. 109–114, <https://doi.org/10.3189/172756401781818905>.
62. Key J., Haefliger M., Arctic ice surface temperature retrieval from AVHRR thermal channels, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 1992, Vol. 97, No. D5, pp. 5885–5893, <https://doi.org/10.1029/92JD00348>.
63. Khvorostovsky K., Rampal P., On retrieving sea ice freeboard from ICESat laser altimeter, *The Cryosphere*, 2016, Vol. 10, No. 5, pp. 2329–2346, <https://doi.org/10.5194/tc-10-2329-2016>.
64. Komarov A. S., Buehner M., Ice concentration from dual-polarization SAR images using ice and water retrievals at multiple spatial scales, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2020, Vol. 59, No. 2, pp. 950–961, DOI: 10.1109/TGRS.2020.3000672.
65. Kwok R., Annual cycles of multiyear sea ice coverage of the Arctic Ocean: 1999–2003, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2004, Vol. 109, No. C11, Art. No. C11004, DOI: 10.1029/2003JC002238.
66. Kwok R., Cunningham G. F., ICESat over Arctic sea ice: Estimation of snow depth and ice thickness, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2008, Vol. 113, No. C8, Art. No. C08010, DOI: 10.1029/2008JC004753.
67. Kwok R., Rignot E., Holt B., Onstott R., Identification of sea ice types in spaceborne synthetic aperture radar data, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1992, Vol. 97, No. C2, pp. 2391–2402, DOI: 10.1029/91JC02652.
68. Laxon S., Peacock N., Smith D., High interannual variability of sea ice thickness in the Arctic region, *Nature*, 2003, Vol. 425, No. 6961, pp. 947–950, DOI: 10.1038/nature02050.
69. Laxon S. W., Giles K. A., Ridout A. L., Wingham D. J., Willatt R., Cullen R., Kwok R., Schweiger A., Zhang J., Haas C., CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume, *Geophysical Research Letters*, 2013, Vol. 40, No. 4, pp. 732–737, <https://doi.org/10.1002/grl.50193>.
70. Leigh S., Wang Z., Clausi D. A., Automated Ice – Water Classification Using Dual Polarization SAR Satellite Imagery, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2014, Vol. 52, No. 9, pp. 5529–5539, DOI: 10.1109/TGRS.2013.2290231.
71. Li M., Zhao C., Zhao Y., Wang Z., Shi L., Polar sea ice monitoring using HY-2A scatterometer measurements, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 8, Art. No. 688, DOI: 10.3390/rs8080688.
72. Lindell D. B., Long D. G., Multiyear Arctic sea ice classification using OSCAT and QuikSCAT, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2015, Vol. 54, No. 1, pp. 167–175, DOI: 10.1109/TGRS.2015.2452215.
73. Lindell D. B., Long D. G., Multiyear Arctic ice classification using ASCAT and SSMIS, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 4, Art. No. 294, DOI: 10.3390/rs8040294.
74. Liu H., Guo H., Zhang L., SVM-based sea ice classification using textural features and concentration from RadarSat-2 dual-pol ScanSAR data, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, Vol. 8, No. 4, pp. 1601–1613, DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2365215.
75. Long D. G., Polar applications of spaceborne scatterometers, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, Vol. 10, No. 5, pp. 2307–2320, DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2629418.
76. Lundhaug M., ERS SAR studies of sea ice signatures in the Pechora Sea and Kara Sea region, *Canadian J. Remote Sensing*, 2002, Vol. 28, No. 2, pp. 114–127, DOI: 10.5589/m02-022.
77. Mäkynen M., Cheng B., Similä M., On the accuracy of thin-ice thickness retrieval using MODIS thermal imagery over Arctic first-year ice, *Annals of Glaciology*, 2013, Vol. 54, No. 62, pp. 87–96, <https://doi.org/10.3189/2013AoG62A166>.
78. Malmgren-Hansen D., Pedersen L. T., Nielsen A. A., Kreiner M. B., Saldo R., Skriver H., Lavelle J., Buus-Hinkler J., Krane K. H., A convolutional neural network architecture for Sentinel-1 and AMSR2 data fusion, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2020, Vol. 59, No. 3, pp. 1890–1902, DOI: 10.1109/TGRS.2020.3004539.
79. Markus T., Cavalieri D. J., An enhancement of the NASA Team sea ice algorithm, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2000, Vol. 38, No. 3, pp. 1387–1398, DOI: 10.1109/36.843033.
80. Martin S., Drucker R., Kwok R., Holt B., Improvements in the estimates of ice thickness and production in the Chukchi Sea polynyas derived from AMSR-E, *Geophysical Research Letters*, 2005, Vol. 32, No. 5, Art. No. L05505, DOI: 10.1029/2004GL022013.
81. Meier W. N., Comparison of passive microwave ice concentration algorithm retrievals with AVHRR imagery in Arctic peripheral seas, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2005, Vol. 43, No. 6, pp. 1324–1337, DOI: 10.1109/TGRS.2005.846151.
82. Meier W. N., Stroeve J., Comparison of sea-ice extent and ice-edge location estimates from passive microwave and enhanced-resolution scatterometer data, *Annals of Glaciology*, 2008, Vol. 48, pp. 65–70, DOI: 10.3189/172756408784700743.
83. Meier W. N., Fetterer F., Stewart J. S., Helfrich S., How do sea-ice concentrations from operational data compare with passive microwave estimates? Implications for improved model evaluations and forecasting, *Annals of Glaciology*, 2015, Vol. 56, No. 69, pp. 332–340, <https://doi.org/10.3189/2015AoG69A694>.

84. *Microwave Remote Sensing of Sea Ice*, Carsey F.D. (ed.), Book ser.: Geophysical Monograph 68, Washington, D. C.: American Geophysical Union, 1992, 462 p.
85. Moen M.-A., Doulgeris A. P., Anfinson S. N., Renner A. H., Hughes N., Gerland S., Eltoft T., Comparison of feature based segmentation of full polarimetric SAR satellite sea ice images with manually drawn ice charts, *The Cryosphere*, 2013, Vol. 7, No. 6, pp. 1693–1705, <https://doi.org/10.5194/tc-7-1693-2013>.
86. Nakamura K., Wakabayashi H., Naoki K., Nishio F., Moriyama T., Uratsuka S., Observation of sea-ice thickness in the Sea of Okhotsk by using dual-frequency and fully polarimetric airborne SAR (Pi-SAR) data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2005, Vol. 43, No. 11, pp. 2460–2469, DOI: 10.1109/TGRS.2005.853928.
87. Nakamura K., Wakabayashi H., Naoki K., Nishio F., Sea-ice thickness retrieval in the Sea of Okhotsk using dual-polarization SAR data, *Annals of Glaciology*, 2006, Vol. 44, pp. 261–268, <https://doi.org/10.3189/172756406781811420>.
88. Naoki K., Ukita J., Nishio F., Nakayama M., Comiso J. C., Gasiewski A., Thin sea ice thickness as inferred from passive microwave and in situ observations, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2008, Vol. 113, No. C2, Art. No. C02S16, DOI: 10.1029/2007JC004270.
89. Nihashi S., Ohshima K. I., Tamura T., Fukamachi Y., Saitoh S., Thickness and production of sea ice in the Okhotsk Sea coastal polynyas from AMSR-E, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2009, Vol. 114, No. C10, Art. No. C10025, DOI: 10.1029/2008JC005222.
90. Ochilov S., Clausi D. A., Operational SAR sea-ice image classification, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, No. 11, pp. 4397–4408, DOI: 10.1109/TGRS.2012.2192278.
91. Park J.-W., Korosov A. A., Babiker M., Sandven S., Won J.-S., Efficient thermal noise removal for Sentinel-1 TOPSAR cross-polarization channel, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2017, Vol. 56, No. 3, pp. 1555–1565, DOI: 10.1109/TGRS.2017.2765248.
92. Park J.-W., Won J.-S., Korosov A. A., Babiker M., Miranda N., Textural noise correction for Sentinel-1 TOPSAR cross-polarization channel images, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2019, Vol. 57, No. 6, pp. 4040–4049, DOI: 10.1109/TGRS.2018.2889381.
93. Park J.-W., Korosov A. A., Babiker M., Won J.-S., Hansen M. W., Kim H.-C., Classification of sea ice types in Sentinel-1 synthetic aperture radar images, *The Cryosphere*, 2020, Vol. 14, No. 8, pp. 2629–2645, <https://doi.org/10.5194/tc-14-2629-2020>.
94. Partington K. C., Flach J. D., Barber D., Isleifson D., Meadows P. J., Verlaan P., Dual-Polarization C-Band Radar Observations of Sea Ice in the Amundsen Gulf, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2010, Vol. 48, No. 6, pp. 2685–2691, DOI: 10.1109/TGRS.2009.2039577.
95. Pedersen L. T., Improved spatial resolution of SSM/I products, In: *Development of new satellite ice data products*, Sandven S. (ed.), Final Rep. No. 145, Bergen, Norway: Nansen Environmental and Remote Sensing Center, 1998.
96. Ramsay B., Manore M., Weir L., Wilson K., Bradley D., Use of RadarSat data in the Canadian Ice Service, *Canadian J. Remote Sensing*, 1998, Vol. 24, No. 1, pp. 36–42.
97. Ramseier R. O., Sea ice validation, In: *DMSR Special Sensor Microwave/Imager Calibration/Validation*, Hollinger J. P. (ed.), Naval Research Laboratory, Washington, D. C., 1991.
98. Remund Q. P., Long D. G., Sea ice extent mapping using Ku-band scatterometer data, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1999, Vol. 104, No. C5, pp. 11515–11527, DOI: 10.1029/98JC02373.
99. Remund Q. P., Long D. G., A decade of QuikSCAT scatterometer sea ice extent data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2013, Vol. 52, No. 7, pp. 4281–4290, DOI: 10.1109/TGRS.2013.2281056.
100. Ressel R., Frost A., Lehner S., A Neural Network-Based Classification for Sea Ice Types on X-Band SAR Images, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, Vol. 8, No. 7, pp. 3672–3680, DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2436993.
101. Ressel R., Singha S., Lehner S., Rösel A., Spreen G., Investigation into different polarimetric features for sea ice classification using X-band synthetic aperture radar, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, Vol. 9, No. 7, pp. 3131–3143, DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2539501.
102. Ricker R., Hendricks S., Kaleschke L., Tian-Kunze X., King J., Haas C., A weekly Arctic sea-ice thickness data record from merged CryoSat-2 and SMOS satellite data, *The Cryosphere*, 2017, Vol. 11, No. 4, pp. 1607–1623, <https://doi.org/10.5194/tc-11-1607-2017>.
103. Rinne E., Similä M., Utilisation of CryoSat-2 SAR altimeter in operational ice charting, *The Cryosphere*, 2016, Vol. 10, No. 1, pp. 121–131, <https://doi.org/10.5194/tc-10-121-2016>.
104. Rivas M. B., Stoffelen A., New Bayesian algorithm for sea ice detection with QuikSCAT, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2011, Vol. 49, No. 6, pp. 1894–1901, DOI: 10.1109/TGRS.2011.2182356.
105. Rivas M. B., Verspeek J., Verhoef A., Stoffelen A., Bayesian Sea Ice Detection with the Advanced Scatterometer ASCAT, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, No. 7, pp. 2649–2657, DOI: 10.1109/TGRS.2011.2182356.

106. Rivas M. B., Ootosaka I., Stoffelen A., Verhoef A., A scatterometer record of sea ice extents and backscatter: 1992–2016, *The Cryosphere*, 2018, Vol. 12, No. 9, pp. 2941–2953, <https://doi.org/10.5194/tc-12-2941-2018>.
107. Rudjord Ø., Solberg R., Spreen G., Gerland S., Estimating thin ice thickness around Svalbard using MODIS satellite imagery, *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 2022, Vol. 104, No. 2, pp 127–149, DOI: 10.1080/04353676.2022.2070158.
108. Scheuchl B., Caves R., Cumming I., Staples G., Automated sea ice classification using spaceborne polarimetric SAR data, *Scanning the Present and Resolving the Future: Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS-2001)*, 2001, Vol. 7, Cat. No. 01CH37217, DOI: 10.1109/IGARSS.2001.978275.
109. Scheuchl B., Caves R., Flett D., DeAbreu R., Arkett M., Cumming I. (2004a), EnviSat ASAR AP data for operational sea ice monitoring, *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS-2004)*, 2004, pp. 2142–2145, DOI: 10.1109/IGARSS.2004.1370782.
110. Scheuchl B., Flett D., Caves R., Cumming I. (2004b), Potential of RadarSat-2 data for operational sea ice monitoring, *Canadian J. Remote Sensing*, 2004, Vol. 30, No. 3, pp. 448–461, <https://doi.org/10.5589/m04-011>.
111. Shokr M., Lambe A., Agnew T., A new algorithm (ECICE) to estimate ice concentration from remote sensing observations: An application to 85-GHz passive microwave data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2008, Vol. 46, No. 12, pp. 4104–4121, DOI: 10.1109/TGRS.2008.2000624.
112. Singh R. K., Oza S. R., Vyas N. K., Sarkar A., Estimation of thin ice thickness from the advanced microwave scanning radiometer-EOS for coastal polynyas in the Chukchi and Beaufort Seas, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2011, Vol. 49, No. 8, pp. 2993–2998, DOI: 10.1109/TGRS.2011.2123101.
113. Smith D. M., Extraction of winter total sea-ice concentration in the Greenland and Barents Seas from SSM/I data, *Remote Sensing*, 1996, Vol. 17, No. 13, pp. 2625–2646, <https://doi.org/10.1080/01431169608949096>.
114. Soh L.-K., Tsatsoulis C., Gineris D., Bertoia C., ARKTOS: An intelligent system for SAR sea ice image classification, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2004, Vol. 42, No. 1, pp. 229–248, DOI: 10.1109/TGRS.2003.817819.
115. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G., Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels, *J. Geophysical Research: Oceans 1978–2012*, 2008, Vol. 113, No. C2, Art. No. C02S03, DOI: 10.1029/2005JC003384.
116. Steffen K., Schweiger A. J., A multisensor approach to sea ice classification for the validation of DMSP-SSM/I passive microwave derived sea ice products, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1990, Vol. 56, pp. 75–82.
117. Svendsen E., Kloster K., Farrelly B., Johannessen O. M., Johannessen J. A., Campbell W. J., Gloersen P., Cavalieri D., Mätzler C., Norwegian remote sensing experiment: Evaluation of the Nimbus-7 scanning multichannel microwave radiometer for sea ice research, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1983, Vol. 88, No. C5, pp. 2781–2791, <https://doi.org/10.1029/JC088iC05p02781>.
118. Svendsen E., Matzler C., Grenfell T. C., A model for retrieving total sea ice concentration from a spaceborne dual-polarized passive microwave instrument operating near 90 GHz, *Intern. J. Remote Sensing*, 1987, Vol. 8, No. 10, pp. 1479–1487, <https://doi.org/10.1080/01431168708954790>.
119. Swan A. M., Long D. G., Multiyear Arctic sea ice classification using QuikSCAT, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, No. 9, pp. 3317–3326, DOI: 10.1109/TGRS.2012.2184123.
120. Swift C. T., Fedor L. S., Ramseier R. O., An algorithm to measure sea ice concentration with microwave radiometers, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1985, Vol. 90, No. C1, pp. 1087–1099, DOI: 10.1029/JC090iC01p01087.
121. Tamura T., Ohshima K. I., Markus T., Cavalieri D. J., Nishashi S., Hirasawa N., Estimation of thin ice thickness and detection of fast ice from SSM/I data in the Antarctic Ocean, *J. Atmospheric and Ocean Technology*, 2007, Vol. 24, No. 10, pp. 1757–1772, <https://doi.org/10.1175/JTECH2113.1>.
122. Tian-Kunze X., Kaleschke L., Maaß N., Mäkynen M., Serra N., Drusch M., Krumpfen T., SMOS-derived thin sea ice thickness: algorithm baseline, product specifications and initial verification, *The Cryosphere*, 2014, Vol. 8, pp. 997–1018, <https://doi.org/10.5194/tc-8-997-2014>.
123. Tonboe R., Lavelle J., *The Eumetsat OSI SAF Sea Ice Concentration Algorithm: Algorithm Theoretical Basis Document, Product OSI-401-b, Version 1.5*, Ocean and Sea Ice SAF, 2016, 17 p.
124. Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K., *Microwave remote sensing: Active and passive. V. 1. Microwave remote sensing fundamentals and radiometry*, Reading, MA: Addison-Wesley Publ. Co., 1981, 470 p.
125. Ye Y., Shokr M., Heygster G., Spreen G., Improving multiyear sea ice concentration estimates with sea ice drift, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 5, Art. No. 397, DOI: 10.3390/rs8050397.
126. Yu P., Qin A. K., Clausi D. A., Feature extraction of dual-pol SAR imagery for sea ice image segmentation, *Canadian J. Remote Sensing*, 2012, Vol. 38, No. 3, pp. 352–366, <https://doi.org/10.5589/m12-028>.
127. Yueh S. H., Kwok R., Lou S.-H., Tsai W.-Y., Sea ice identification using dual-polarized Ku-band scatterometer data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1997, Vol. 35, No. 3, pp. 560–569, DOI: 10.1109/36.581968.

128. Zabolotskikh E. V., Balashova E. A., Kudryavtsev V. N., Chapron B., Synergistic Use of Satellite Scatterometer, SAR and Altimeter Data to Study First Year Sea Ice Properties, *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS-2021)*, 2021, pp. 5633–5636, DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553828.
129. Zakhvatkina N. Y., Alexandrov V. Y., Johannessen O. M., Sandven S., Frolov I. Y., Classification of sea ice types in EnviSat synthetic aperture radar images, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2012, Vol. 51, No. 5, pp. 2587–2600, DOI: 10.1109/TGRS.2012.2212445.
130. Zakhvatkina N., Korosov A., Muckenhuber S., Sandven S., Babiker M., Operational algorithm for ice – water classification on dual-polarized RADARSAT-2 images, *The Cryosphere*, 2017, Vol. 11, No. 1, pp. 33–46, DOI: 10.5194/tc-11-33-2017.
131. Zakhvatkina N., Smirnov V., Bychkova I., Satellite SAR Data-based Sea Ice Classification: An Overview, *Geosciences*, 2019, Vol. 9, No. 4, Art. No. 152, DOI: 10.3390/geosciences9040152.
132. Zhai X., Wang Z., Zheng Z., Xu R., Dou F., Xu N., Zhang X., Sea Ice Monitoring with CFOSAT Scatterometer Measurements Using Random Forest Classifier, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, No. 22, Art. No. 4686, DOI: 10.3390/rs13224686.
133. Zhang Z., Yu Y., Shokr M., Li X., Ye Y., Cheng X., Chen Z., Hui F., Intercomparison of Arctic Sea Ice Backscatter and Ice Type Classification Using Ku-Band and C-Band Scatterometers, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2021, Vol. 60, DOI: 10.1109/TGRS.2021.3099835.
134. Zibordi G., Van Woert M., Meloni G. P., Canossi I., Intercomparisons of sea ice concentration from SSM/I and AVHRR data of the Ross Sea, *Remote Sensing of Environment*, 1995, Vol. 53, No. 3, pp. 145–152, DOI: 10.1016/0034-4257(94)00100-2.