

ОКЕАНОЛОГИЯ
OCEANOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-10-28>
УДК 551.326.7 (326.02)



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

**Возможности исследования возрастных характеристик льда
Карского моря на основе спутниковых данных CryoSat-2 и SMOS**

*В.В. Кириллов¹, О.В. Ловцкая¹, О.С. Девятаев², Е.В. Афанасьева^{2,3},
А.И. Сеницкий⁴, Л.А. Хворова⁵, Д.С. Фокин¹, А.Н. Семчуков¹,
М.И. Ковешников¹, Н.М. Ковалевская^{1*}*

¹ — ФГБУН Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

² — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

³ — ФГБУН Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

⁴ — ГАУ ЯНАО Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия

⁵ — ФГБОУ ВО Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

**kntm@iwep.ru*

Резюме

Получение информации о пространственно-временной изменчивости распределения толщины льда — ключевой вопрос для прогноза состояния арктического морского льда. Несмотря на очевидные успехи применения данных CryoSat-2 и SMOS, соответствующие оценки толщин морского льда нуждаются в валидации. В качестве эталонов для сравнения на основе метода максимального правдоподобия были выбраны детализированные ледовые карты ААНИИ (октябрь–апрель 2010–2018 гг.). В статье приводятся результаты распознавания различных возрастных стадий льда Карского моря, наилучшие результаты показали многолетний, однолетний толстый, средний лед и нилас. Использование данных Cryosat-2, SMOS и их комбинации Cryosat-2 & SMOS может помочь в комплексном анализе всей доступной информации для гидрометеорологического и навигационного обеспечения.

Ключевые слова: Карское море, комбинация CryoSat-2 & SMOS, ледовые карты ААНИИ, толщина льда, CryoSat-2, SMOS.

Для цитирования: Кириллов В.В., Ловцкая О.В., Девятаев О.С., Афанасьева Е.В., Сеницкий А.И., Хворова Л.А., Фокин Д.С., Семчуков А.Н., Ковешников М.И., Ковалевская Н.М. Возможности исследования возрастных характеристик льда Карского моря на основе спутниковых данных CryoSat-2 и SMOS // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 1. С. 10–28. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-10-28>.

Поступила 21.10.2022

После переработки 27.12.2022

Принята 19.01.2023

Possibilities of investigating ice development of the Kara sea based on CryoSat-2 and SMOS data

Vladimir V. Kirillov¹, Olga V. Lovtskaya¹, Oleg S. Devyataev², Ekaterina V. Afanasyeva^{2,3}, Anton I. Sinitsky⁴, Lubov' A. Khvorova⁵, Denis S. Fokin¹, Alexander N. Semchukov¹, Mikhail I. Koveshnikov¹, Nelley M. Kovalevskaya^{1}*

¹ — *Federal state budgetary institution of science Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IWEP SB RAS), Barnaul, Russia*

² — *State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia*

³ — *Federal state budgetary institution of science Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI), Moscow, Russia*

⁴ — *Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District, Salekhard, Russia*

⁵ — *Federal state budgetary educational institution of higher education Altai State University, Barnaul, Russia*

**knm@iwep.ru*

Summary

Sea ice age is a proxy for thickness, which can be obtained through the use of satellite data. The paper presents the results of comparison of CryoSat-2, SMOS and CryoSat-2 & SMOS fusion data with detailed ice charts (October–April, 2010–2018). The AARI ice charts were chosen as references for comparison because they integrate knowledge and data from various sources, including expert analysis of operational satellite information, in-situ measurements at coastal stations, data on ice conditions from ships of the Northern Sea Route (NSR). The division of satellite data elements into classes (stages of development) was performed according to the maximum likelihood classifier. The recognition result for each stage of development was evaluated by means of three criteria, in accordance with the class value of *Mode*, *Median* and *Mean*. The effectiveness of satellite data in determining the Kara Sea ice thickness varies depending on the sea ice stage of development and winter season time. Four stages of development (old ice, thick first-year ice, medium first-year ice, nilas) showed the best recognition results. Although the CryoSat-2 mission was designed primarily to detect climate-dependent variations of the thickness of floating ice, in terms of statistical recognition of the Kara Sea ice stages of development, CryoSat-2 data can also be used to retrieve the thickness of thick first-year ice (January–April) and the thickness of medium first-year ice (January–February). For the remaining stages within the study area, the altimetry method shows a significant uncertainty, which can be resolved for nilas, thin first-year ice and medium first-year ice (March) by using SMOS data and CryoSat-2 & SMOS fusion data. In general, altimetric data, radiometric data and combination thereof can be applied in the complex analysis of all available information to ensure hydrometeorological and navigation support. Also, it is proposed to use the data of the ICESat-2 laser altimeter and to make a general comparison with in-situ measurements.

Keywords: AARI ice maps, CryoSat-2, CryoSat-2 & SMOS combination, ice thickness, Kara Sea, SMOS.

For Citation: Kirillov V.V., Lovtskaya O.V., Devyataev O.S., Afanasyeva E.V., Sinitsky A.I., Khvorova L.A., Fokin D.S., Semchukov A.N., Koveshnikov M.I., Kovalevskaya N.M. Possibilities of investigating ice development of the Kara sea based on CryoSat-2 and SMOS data. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2023, 69 (1): 10-28. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-10-28>.

Received 21.10.2022

Revised 27.12.2022

Accepted 19.01.2023

ВВЕДЕНИЕ

Освоение минеральных ресурсов криолитозоны, при существенной роли России в обеспечении углеводородным сырьем жителей Азии и Европы, требует поиска техно-

логий, не нарушающих хрупкое экологическое равновесие Арктики. В настоящее время на акватории залива Карского моря — Обской губы осуществляется круглогодичная навигация в порт Сабетта и к Новопортовскому терминалу (п-ов Ямал), к Салмановскому причалу (п-ов Гыдан). Для развития транспортной инфраструктуры и расширения поставок из ЯНАО на основе Северного морского пути (СМП) и тяготеющих к нему речных коммуникаций необходимо учитывать возможные климатические изменения.

Для реконструкции изменения ледяного покрова используются различные типы наблюдений за морским льдом, в том числе — спутниковые данные с 1979 г. [1] и прямые наблюдения с 1850 г. [2]. Согласно последней оценке межправительственной группы экспертов ООН по изменению климата (МГЭИК) в последние годы площадь арктического морского льда была самой низкой с 1850 г. с точки зрения среднегодового значения [3]. МГЭИК пришла к выводу, что «Арктика, вероятно, будет практически свободна от морского льда в сентябре, по крайней мере, один раз до 2050 года» [3, с. 16].

Чувствительным индикатором изменения климата и характеристикой, оказывающей существенное влияние на сопротивление льдов движению судна, является толщина льда. Существует значительный геофизический интерес к пространственному распределению этого важного показателя общих ледовых условий, обеспечивающего третье измерение ледяного покрова (после сплоченности и ледовитости), в том числе для документирования изменений, тенденций и понимания процессов, а также для использования в построении прогнозов поведения ледяного покрова в различных временных масштабах [4]. Толщина морского льда является климатически значимой переменной, которая обеспечивает интегрированную меру изменений в энергетическом балансе высоких широт [5]. Таким образом, прогноз состояния арктического морского льда — сложная задача, ключевым вопросом которой является информация о пространственно-временной изменчивости толщины льда.

Основным российским материалом о ледовой обстановке в арктических морях являются ледовые карты, создаваемые в ААНИИ [6]. Уникальная особенность детализированных ледовых карт ААНИИ — использование знаний ледовых экспертов и экспертного анализа оперативной спутниковой информации с привлечением данных контактных измерений на припаях вблизи береговых станций и данных о ледовой обстановке с судов на трассах СМП [7]. По ледовым картам ААНИИ определяется распределение важнейших характеристик ледяного покрова, в том числе возрастных стадий развития морского льда. Возраст морского льда является косвенным показателем толщины, поскольку лед становится толще в течение осенне-зимнего сезона замерзания и далее в течение последовательных зимних периодов [8]. Толщина и возрастные стадии морского льда, по крайней мере для первого годичного цикла развития, демонстрируют прямую связь при сравнении в панарктических или региональных пространственных масштабах, карты с указанием возрастных стадий льда могут быть использованы в качестве косвенных показателей для толщины, когда она не может быть непосредственно измерена [9].

Для оценки толщин используются как непосредственно контактные, так и разнообразные дистанционные измерения, в том числе спутниковые, хотя толщину морского льда гораздо труднее измерить из космоса, чем сплоченность и ледовитость [10]. Тем не менее новые технологии обеспечивают большие прорывы. В частности, спутниковая альтиметрия позволила на основе прямых измерений превышения льда получать регулярные оценки толщины и далее объема морского льда по всему Арктическому бассейну, начиная с радиолокационного высотомера ESA CryoSat-2, за-

пущенного в 2010 г. [11]. Многие исследования толщины морского льда базируются на информации, полученной с помощью радиолокационной альтиметрии как со спутника Cryosat-2, так и на измерениях радиояркостной температуры со спутника Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS), запущенного в 2009 г. [12–15].

Несмотря на очевидные успехи применения данных CryoSat-2 и SMOS, исследователи сходятся во мнении, что не существует золотого стандарта для оценки средней толщины морского льда, все существующие методы измерения имеют один или несколько крупных источников неопределенности и соответствующие оценки толщин морского льда нуждаются в валидации [5, 14, 16–18]. Ряд исследователей показывает, что решение проблемы неопределенностей зависит от специфики акватории (разное время начала таяния и сокращения площади льда, возможное влияние адвекции льда и т. д.) [8, 15].

Задачей представленного исследования было сравнение эффективности использования искомым спутниковых данных для Карского моря с детализированными ледовыми картами ААНИИ (портал <http://wdc.aari.ru/datasets/d0004/kar/> — последний доступ: 01.08.2022), которые были выбраны в качестве эталонов, интегрирующих знания и данные различной природы о возрастных характеристиках морского льда.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Ледовые карты и специфика исследуемой акватории

Ледовые карты ААНИИ представляют собой результат визуального дешифрирования спутниковых изображений, получаемых в различных диапазонах электромагнитного спектра, а именно: видимом, инфракрасном (ИК) и микроволновом (включает в себя пассивную и активную съемку). Также привлекается вспомогательная гидрометеорологическая информация с береговых станций и судов [7].

При анализе спутниковых изображений эксперты руководствуются знанием дешифровочных признаков различных типов льда, регламентированных стандартом Всемирной метеорологической организации (ВМО) «Номенклатура ВМО по морскому льду» [19]. Дешифровочные признаки включают в себя тональные и текстурные характеристики льдов в сочетании с общей структурой ледяного покрова на снимке. Под структурой здесь подразумеваются частота и взаимная ориентация каналов и разводий во льду, размер и форма встречающихся ледяных полей и т. п. Эти характеристики также воспринимаются экспертом и учитываются при определении возраста льда.

Экспертный анализ спутниковых изображений, по сути, заключается в выделении зон, ледовые условия внутри которых однородны, с последующим присвоением этим зонам соответствующих ледовых характеристик: сплоченность, возраст, форма льда (размеры полей). В зависимости от указанных характеристик зоне присваивается цвет и символ.

Для описания особенностей ледового режима Карского моря обратимся к результатам, полученным специалистами ААНИИ на основе анализа электронных ледовых карт за 1997–2017 гг. [20, 21].

В северо-восточной части моря, расположенной к северу от линии м. Желания — о. Диксон, ледообразование при среднеклиматических условиях начинается в конце августа — начале сентября. К концу октября район может быть полностью покрыт молодыми льдами. Далее молодой лед постепенно переходит в градацию однолетнего тонкого льда. С середины января до середины апреля среди дрейфующих льдов преобладает однолетний средний. С конца апреля может отмечаться преобладание однолетнего толстого льда.

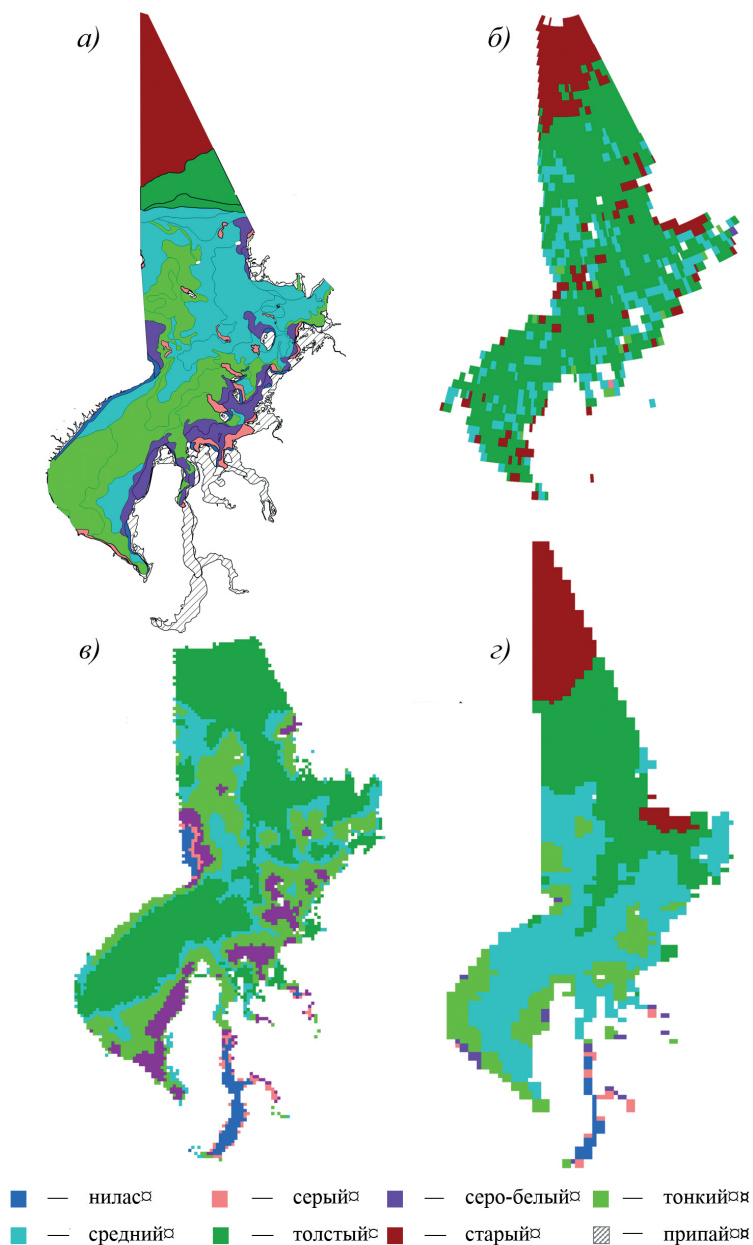


Рис. 1. Ледовая карта ААНИИ (а), данные спутников CryoSat-2 (б), SMOS (в) и спутниковой комбинации CryoSat-2 & SMOS (г), март 2018 г. Использована единая окраска данных по возрастным градациям (интервалам толщины льда) в соответствии с российской национальной символикой ледовых карт [23]

Fig. 1. AARI ice chart (a) and data from CryoSat-2 (b), SMOS (c) and CryoSat-2 & SMOS (d), March of 2018. The colour coding of the ice charts is based on the Russian national colour standard for stages of ice development (ice thickness intervals) [23]

В юго-западной части моря лед начинает формироваться в начале октября. К концу ноября, опять же при среднеклиматических условиях, район полностью покрывается льдами, когда процесс ледообразования достигает пролива Карские Ворота. Преобладание молодых льдов сохраняется до начала января, а с середины месяца в преобладание переходит однолетний тонкий лед. Однолетний средний лед преобладает с конца февраля вплоть до окончания зимнего периода в Арктике, до мая. Однолетний толстый лед начинает формироваться в конце февраля, но в преобладание переходит лишь в редких случаях, а в отдельные годы он вовсе не формируется.

К окончанию зимнего сезона среди дрейфующих льдов Карского моря присутствуют все возрастные градации от ниласа до однолетнего толстого льда за счет постоянного обновления льда в полыньях и разводьях.

Нарастание толщины припайного льда во всем море происходит быстрее, чем в дрейфующих льдах.

Описанные особенности ледового режима относятся к периоду потепления в Арктике, начавшемуся во второй половине 1980-х гг. Если в марте 1985 г. до трети ледяного покрова составлял многолетний лед возрастом более 4 лет, то в марте 2019 г. многолетний лед такого возраста составлял только порядка одного процента от общей площади льда в Северном Ледовитом океане [22]. Полученная на основе данных CryoSat-2 & SMOS среднемесячная толщина морского льда в апреле 2021 г. была ниже, чем в том же месяце в предыдущие годы [8].

В нашем исследовании толщина льда Карского моря анализировалась на основе использования детализированных ледовых карт распределения льда различного возраста в Карском море и трех наборов спутниковых данных: CryoSat-2 sea ice thickness (L2P); SMOS sea ice thickness (L3); комбинация Cryosat-2 & SMOS sea ice thickness (L4). Данные представлены на рис. 1 и в табл. 1 (АВИ – Институт им. Альфреда Вегенера). Ежемесячные данные CryoSat-2 анализировались на основе использования одной из еженедельных ледовых карт соответствующего месяца.

Таблица 1

Ледовые данные, использованные в исследовании

Table 1

Ice data used in the study

Продукт	Производитель/спутник	Распространитель	Период исследования	Временное разрешение	Разрешение (км)
Детализированные ледовые карты распределения льдов различного возраста	ААНИИ	ААНИИ, Россия	2010–2018	7 дней	0,1 – 25 в зависимости от используемого набора снимков ИСЗ
Sea Ice Thickness CS2 L2P	CryoSat-2	АВИ, Германия	2010–2018	Ежемесячно (январь–апрель, октябрь–декабрь)	25
Sea Ice Thickness SMOS L3	SMOS	АВИ, Германия	2010–2018	Ежедневно	12,5
Sea Ice Thickness CS2 SMOS L4	CryoSat-2 & SMOS	АВИ, Германия	2010–2018	Ежедневно	25

CryoSat-2

Основной целью миссии CryoSat-2 является определение толщины арктического морского льда на основе измерений превышения снежно-ледяного слоя методом радиолокационной альтиметрии и последующих преобразований при предположении гидростатического равновесия.

Эффективность использования данных CryoSat-2 о толщине морского льда была продемонстрирована многими исследованиями [10, 17, 24–26]. Так, данные CryoSat-2 использовались: для улучшения физической модели морского льда [25]; для получения вывода о том, что «судьба арктического летнего морского льда в значительной степени зависит от атмосферных условий во время сезона таяния, а не от зимних температур» [25, с. 125]; для проверки гипотезы о том, что стабилизирующая обратная связь зимнего прироста льда ослабляется усиливающимся влиянием более теплых подповерхностных атлантических вод и поверхностных вод в Карском море, в частности [26].

Алгоритм, разработанный в Институте им. Альфреда Вегенера (АВИ) для получения данных Sea Ice Thickness CS2 L2P, состоит из двух основных этапов: оценка превышения морского льда над уровнем моря по данным CryoSat-2 и преобразование превышения в толщину морского льда с использованием дополнительных наборов данных (рельеф, тип подстилающей поверхности, плотность и высота снежного покрова и т. д.) [28]. Большая часть привлекаемых данных может быть определена в режиме почти реального времени (+2 дня), исключения составляют ежемесячные климатические данные по снегу. Использование последних влияет, в частности, на эффективность определения толщины молодого морского льда по данным CryoSat-2: такой лед имеет тонкий снежный покров, но при обработке в соответствии с алгоритмом АВИ используется статистическая (завышенная) оценка высоты снежного покрова.

Таким образом, метод извлечения информации о толщине из исходных данных CryoSat-2 недостаточно чувствителен для льда с толщиной, меньшей, чем некоторая граница $Ice_{thick} \sim 1$ м [14]. Значение этой границы — условная величина, что является одним из аспектов неопределенности измерений толщины и нуждается в конкретизации в зависимости от специфики акватории и месяца зимнего сезона [15, 27].

Неэффективность измерения с помощью данных CryoSat-2 для льда с толщиной $< Ice_{thick}$ может быть компенсирована измерениями с помощью данных SMOS, которые предназначены для измерения толщин $< Ice_{thick}$ [14].

SMOS

Другой метод измерения толщины основан на оценке яркостной температуры над поверхностью с помощью L-диапазона спутника миссии SMOS, которая обеспечивает наблюдения с высоким временным разрешением (на ежедневной основе). Зависимость толщины льда от яркостной температуры позволяет использовать данные SMOS для оценки толщины морского льда с толщиной $< Ice_{thick}$ [13].

Относительные неопределенности измерения толщины льда с помощью CryoSat-2 и SMOS носят взаимодополняющий характер [14]. Пространственный охват также носит дополняющий характер из-за различных наклонов орбит. Предполагается, что комбинация данных CryoSat-2 и данных SMOS характеризуется меньшей неопределенностью измерений по сравнению с неопределенностями измерений отдельных спутников.

CryoSat-2 & SMOS

Совместная обработка данных CryoSat-2 и SMOS основана на специальном статистическом подходе оптимальной интерполяции, разработанном в АВИ, который объединяет информацию от CryoSat-2 и SMOS для различных классов толщины льда ($> Ice_{thick} < Ice_{thick}$). Совместный продукт был разработан в рамках проекта EKA SMOS+ Sea Ice для получения пространственной оценки толщины льда с разрешением 25 км [14].

Цель данного исследования состоит в том, чтобы рассмотреть возможности продуктов CryoSat-2, SMOS и их комбинации, в том числе определить значение границы Ice_{thick} для исследуемой акватории, принимая во внимание необходимость использования оценок пространственного распределения толщины льда Карского моря, а также взаимодополняемость данных CryoSat-2 и SMOS.

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ

Сравнение результатов обработки спутниковых данных CryoSat-2, SMOS, CryoSat-2 & SMOS с соответствующими ледовыми картами (октябрь–апрель 2010–2018 гг.) осуществлялось на основе статистической классификации. Элементы спутниковых данных (12,5×12,5 км², 25×25 км²) разбивались на классы в соответствии с возрастными стадиями на ледовой карте (рис. 2).

В основе такого разбиения — классификатор с обучением, использующий метод максимального правдоподобия [29]. Для старого льда рассматривался интервал толщин [2 м; 3 м), крайняя правая граница выбиралась в соответствии с рекомендацией брать «открытый» интервал, близкий предыдущему [30].

Результат распознавания каждой возрастной стадии оценивался по нескольким критериям. Если бóльшая модальная вершина (*Mode*) распределения спутниковых элементов класса, соответствующего некоторой возрастной стадии, попадает в интервал толщин той же самой возрастной стадии, то считалось, что эти спутниковые данные позволяют распознавать лед конкретной возрастной стадии *на основе критерия по значению моды*. Для каждой ситуации попадания модальной вершины в искомый интервал толщин рассчитывался процент распознавания ($Proc_{rec}$). Чем

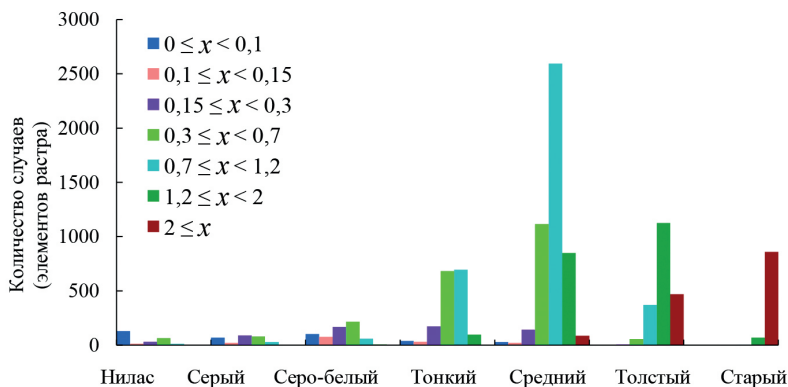


Рис. 2. Распределение элементов комбинации CryoSat-2 & SMOS по классам (возрастным стадиям), март, 2010–2018 гг.

Fig. 2. Distribution of CryoSat-2 & SMOS elements over different classes (development stages), March, 2010–2018

выше значения $Proc_{rec}$, тем лучший результат показывают спутниковые данные по отношению к искомой возрастной стадии. Проверка достоверности полученных распознаваний проводилась с помощью критерия Стьюдента для сравнения относительных частот внутри одного класса [31] в двух категориях случаев: $Proc_{rec} > 50\%$ (надежное распознавание) и $Proc_{rec} < 50\%$ (менее надежное распознавание). В последующих расчетах использовались только достоверные распознавания (табл. 2–6).

В нашем исследовании также рассматривались дополнительные описательные статистические характеристики — медиана (*Median*), среднее значение (*Mean*), стандартное отклонение (*StD*), асимметрия (*Skewness*) и эксцесс (*Excess*) — и два дополни-

Таблица 2

Результаты распознавания возрастных стадий по спутниковым данным CryoSat-2

Table 2

Results of development stage recognition based on CryoSat-2 data

Месяц	Ледовые карты (2010–2018 гг.) Возрастная стадия [толщина льда, м]	Cryosat-2 (2010–2018 гг.)						
		<i>Mode</i>	<i>Proc_{rec}</i> (%)	<i>Median</i>	<i>Mean</i>	<i>StD</i>	<i>Skewness</i>	<i>Excess</i>
Ноябрь	Тонкий [0,3; 0,7]	0,58	47	0,65	0,77	0,43	0,96	0,35
Декабрь	Тонкий [0,3; 0,7]	0,65	46	0,68	0,76	0,37	1,06	1,71
Январь	Средний [0,7; 1,2]	1,02	58	1,04	1,11	0,38	0,43	0,003
Январь	Толстый [1,2; 2]	1,53	62	1,5	1,53	0,62	1,64	0,26
Февраль	Средний [0,7; 1,2]	1,12	52	1,15	1,25	0,40	0,63	0,46
Февраль	Толстый [1,2; 2]	1,61	81	1,62	1,66	0,54	1,68	0,58
Февраль	Старый [2; 3]	2,45	84	2,4	2,35	1,15	1,07	–1,84
Март	Толстый [1,2; 2]	1,69	71	1,74	1,83	0,43	0,78	–0,73
Март	Старый [2; 3]	2,44	82	2,39	2,34	0,61	1,05	–1,84

Таблица 3

Результаты распознавания возрастных стадий по спутниковым данным SMOS

Table 3

Results of development stage recognition based on SMOS data

Месяц	Ледовые карты (2010–2018 гг.) Возрастная стадия [толщина льда, м]	SMOS (2010–2018 гг.)						
		<i>Mode</i>	<i>Proc_{rec}</i> (%)	<i>Median</i>	<i>Mean</i>	<i>StD</i>	<i>Skewness</i>	<i>Excess</i>
Октябрь	Нилас [0,0; 0,1]	0,059	38	0,15	0,22	0,19	1,39	1,95
Октябрь	Серо-белый [0,15; 0,3]	0,25	45	0,26	0,35	0,25	1,23	0,75
Ноябрь	Нилас [0,0; 0,1]	0,055	66	0,075	0,14	0,19	2,64	6,91
Ноябрь	Тонкий [0,3; 0,7]	0,57	60	0,58	0,62	0,24	0,17	–0,81
Декабрь	Нилас [0,0; 0,1]	0,054	56	0,089	0,19	0,21	1,91	3,42
Декабрь	Тонкий [0,3; 0,7]	0,68	47	0,66	0,68	0,26	–0,20	–1,23
Январь	Нилас [0,0; 0,1]	0,051	69	0,073	0,21	0,30	1,95	3,54
Январь	Тонкий [0,3; 0,7]	0,66	48	0,65	0,68	0,25	–0,10	–1,37
Январь	Средний [0,7; 1,2]	0,88	69	0,84	0,81	0,21	–0,87	–1,12
Февраль	Нилас [0,0; 0,1]	0,059	40	0,14	0,24	0,26	1,70	1,95
Февраль	Тонкий [0,3; 0,7]	0,60	46	0,57	0,60	0,29	–0,008	–1,16
Февраль	Средний [0,7; 1,2]	0,87	64	0,81	0,77	0,24	–0,88	–0,59
Март	Нилас [0,0; 0,1]	0,053	54	0,093	0,21	0,23	1,61	3,57
Март	Тонкий [0,3; 0,7]	0,62	43	0,56	0,59	0,29	0,017	–1,27
Март	Средний [0,7; 1,2]	0,84	57	0,76	0,73	0,26	–0,64	–0,96
Апрель	Тонкий [0,3; 0,7]	0,47	42	0,36	0,41	0,28	0,58	–0,48

Эффективность распознавания ниласа на основании данных SMOS

Table 4

Effectiveness of nilas recognition based on SMOS data

Месяц	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март
<i>Proc_{rec}</i>	38 %	66 %	56 %	69 %	40 %	54 %

Таблица 5

Результаты распознавания возрастных стадий по комбинации CryoSat-2 & SMOS

Table 5

Results of development stage recognition based on CryoSat-2 & SMOS

Месяц	Ледовые карты (2010–2018 гг.) Возрастная стадия [толщина льда, м)	CryoSat-2 & SMOS (2010–2018 гг.)						
		<i>Mode</i>	<i>Proc_{rec}</i> (%)	<i>Median</i>	<i>Mean</i>	<i>StD</i>	<i>Skewness</i>	<i>Excess</i>
Октябрь	Нилас [0,0; 0,1)	0,055	45	0,11	0,21	0,21	1,54	2,21
Октябрь	Серо-Белый [0,15; 0,3)	0,26	34	0,50	0,7	0,54	0,70	-1,01
Ноябрь	Нилас [0,0; 0,1)	0,054	69	0,072	0,14	0,19	2,81	7,88
Декабрь	Нилас [0,0; 0,1)	0,056	61	0,082	0,15	0,17	1,99	3,84
Январь	Нилас [0,0; 0,1)	0,051	68	0,074	0,27	0,42	2,02	3,1
Январь	Средний [0,7; 1,2)	0,99	73	1,01	1,08	0,31	1,10	1,20
Январь	Толстый [1,2; 2)	1,67	77	1,72	1,81	0,38	1,28	-0,37
Февраль	Средний [0,7; 1,2)	0,98	68	1,0	1,06	0,36	1,018	1,57
Февраль	Толстый [1,2; 2)	1,6	84	1,59	1,61	0,32	0,71	2,01
Февраль	Старый [2; 3)	2,47	91	2,45	2,42	0,27	-3,0	3,97
Март	Нилас [0,0; 0,1)	0,053	51	0,098	0,25	0,31	2,76	7,59
Март	Средний [0,7; 1,2)	0,93	54	0,91	0,96	0,43	0,88	12,98
Март	Толстый [1,2; 2)	1,63	55	1,97	1,65	0,55	0,15	1,45
Март	Старый [2; 3)	2,48	92	2,46	2,43	0,25	-3,27	-0,51
Апрель	Тонкий [0,3; 0,7)	0,52	42	0,45	0,50	0,34	0,78	9,44
Апрель	Средний [0,7; 1,2)	0,78	45	0,71	0,73	0,34	0,55	0,57
Апрель	Старый [2; 3)	2,46	87	2,43	2,38	0,31	-2,30	0,81

Таблица 6

Эффективность распознавания ниласа на основании данных CryoSat-2 & SMOS

Table 6

Effectiveness of nilas recognition based on CryoSat-2 & SMOS data

Месяц	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Март
<i>Proc_{rec}</i>	45 %	69 %	61 %	68 %	51 %

тельных критерия распознавания. Если спутниковые данные позволяют распознавать лед некоторой возрастной градации на основе критерия по значению моды, а медиана соответствующего распределения попадает в тот же интервал толщин, то считалось, что эти спутниковые данные позволяют распознавать лед конкретной возрастной градации *на основе двух критериев — по значению моды и по значению медианы*. Если спутниковые данные позволяют распознавать лед конкретной возрастной градации на основе двух критериев, а среднее значение соответствующего распределения попадает в тот же интервал толщин, то считалось, что эти спутниковые данные позволяют распознавать лед конкретной возрастной градации *на основе трех критериев — по значению моды, по значению медианы и по значению среднего значения*.

Результаты по данным CryoSat-2

В табл. 2 и на рис. 3 представлены возможности распознавания возрастных стадий льда на основе использования спутниковых данных CryoSat-2 и различных критериев.

В случаях $Proc_{rec} > 50\%$ распознавание возрастных стадий возможно на основе трех критериев: средний лед (январь–февраль), толстый лед (январь–апрель), старый лед (февраль–апрель).

При этом результаты распознавания *многолетнего льда* показывают наибольший процент распознавания (85–85%), StD в интервале [0,61–1,15]. Результаты распознавания *толстого льда* также показывают высокий $Proc_{rec}$ (62–81%), StD в интервале [0,43–0,62]. Для *среднего льда* $Proc_{rec} > 50\%$ (52–58%), StD в интервале [0,38–0,4].

Тонкий лед в ноябре–декабре распознается на основе данных CryoSat-2 с $Proc_{rec} < 50\%$, возможно использование любого из двух критериев — по значениям моды и/или медианы.

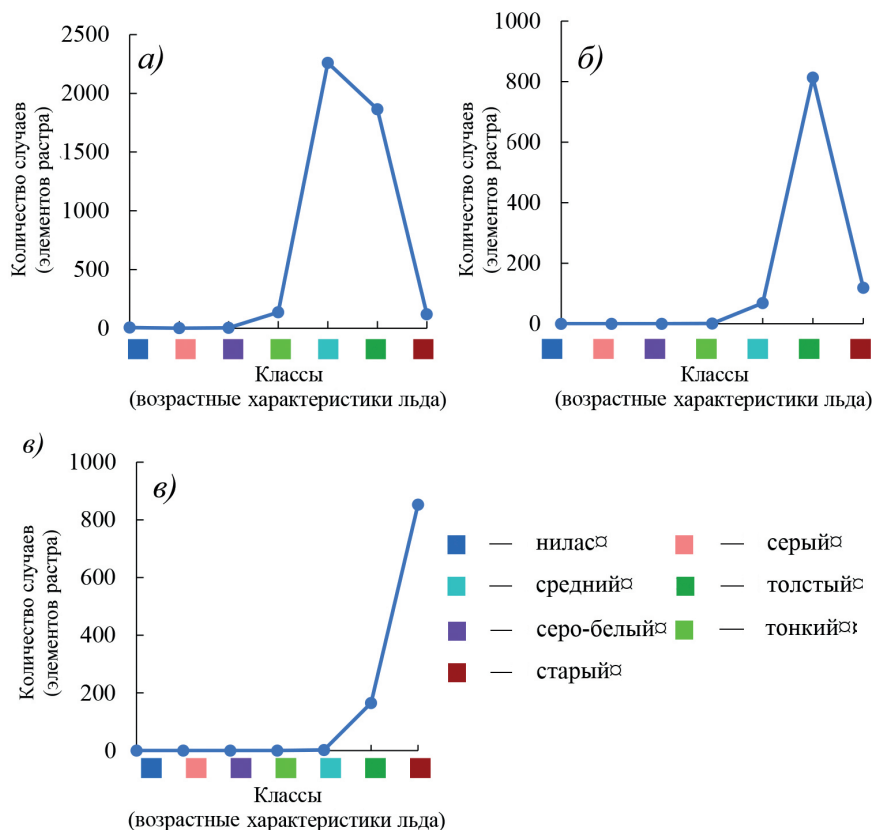


Рис. 3. Распределения элементов CryoSat-2 для разных классов (февраль, 2010–2018 гг.): а) — средний лед, б) — толстый лед, в) — старый лед

Fig. 3. Distribution of CryoSat-2 elements over different classes (February, 2010–2018): а) — medium first-year ice, б) — thick first-year ice, в) — old ice

Результаты по данным SMOS

В табл. 3 и на рис. 4 представлены возможности распознавания возрастных стадий льда на основе использования спутниковых данных SMOS и различных критериев. В отличие от CryoSat-2, SMOS обнаруживает способность распознавать нилас в течение почти полного зимнего арктического сезона (октябрь–март). Также SMOS показывает большую, чем CryoSat-2, способность распознавать тонкий лед (октябрь–апрель) и хорошую способность распознавать средний лед в январе–марте.

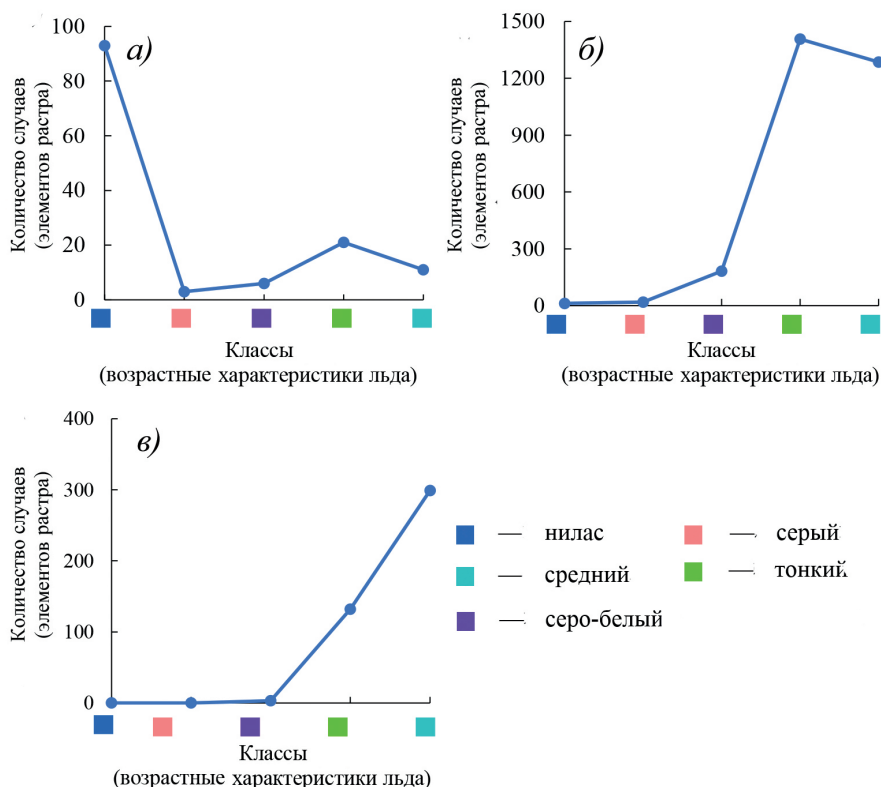


Рис. 4. Распределения элементов SMOS для разных классов (январь, 2010–2018 гг.): а) — нилас, б) — тонкий лед, в) — средний лед

Fig. 4. Distribution of SMOS elements over different classes (January, 2010–2018): а) — nilas, б) — thin first-year ice, в) — medium first-year ice

Нилас может быть распознан с помощью данных SMOS на основании двух критериев, при этом эффективность распознавания ниласа на основании модального критерия чередуется относительно границы $Proc_{rec} = 50\%$ от месяца к месяцу (табл. 4).

Тонкий лед может быть распознан на основе использования любого из трех критериев. Минимальное значение стандартного отклонения (0,24) достигается при распознавании тонкого льда в единственном месяце с $Proc_{rec} > 50\%$ (ноябрь; $Proc_{rec} = 60\%$), для всех остальных месяцев зимнего арктического сезона (декабрь–апрель; $Proc_{rec} < 50\%$) StD принимает значения, близкие к минимальному ([0,25; 0,29])

Средний лед распознается с помощью данных SMOS в трех месяцах зимнего арктического периода (январь–март) с $Proc_{rec} > 50\%$ на основе трех критериев, StD в узком интервале [0,24; 0,26].

Результаты по комбинации данных CryoSat-2 & SMOS

В табл. 5 и на рис. 5 представлены возможности распознавания возрастных стадий льда на основе использования комбинации спутниковых данных CryoSat-2 & SMOS и различных критериев. *Нилас* распознается на основе использования комбинации спутниковых данных почти во все месяцы арктического зимнего периода (октябрь–март), как и на основании использования данных SMOS. Основные критерии распознавания — по моде и медиане, вариации $Proc_{rec}$ по месяцам (табл. 6) сопоставимы с вариациями, полученными при использовании данных SMOS (см. табл. 4).

Средний лед надежно распознается на основе использования комбинации CryoSat-2 & SMOS с января по апрель с убывающим $Proc_{rec}$: 73 % (январь), 68 % (февраль), 54 % (март), 45 % (апрель). Возможно использование трех критериев распознавания, StD попадает в интервал [0,31; 0,43].

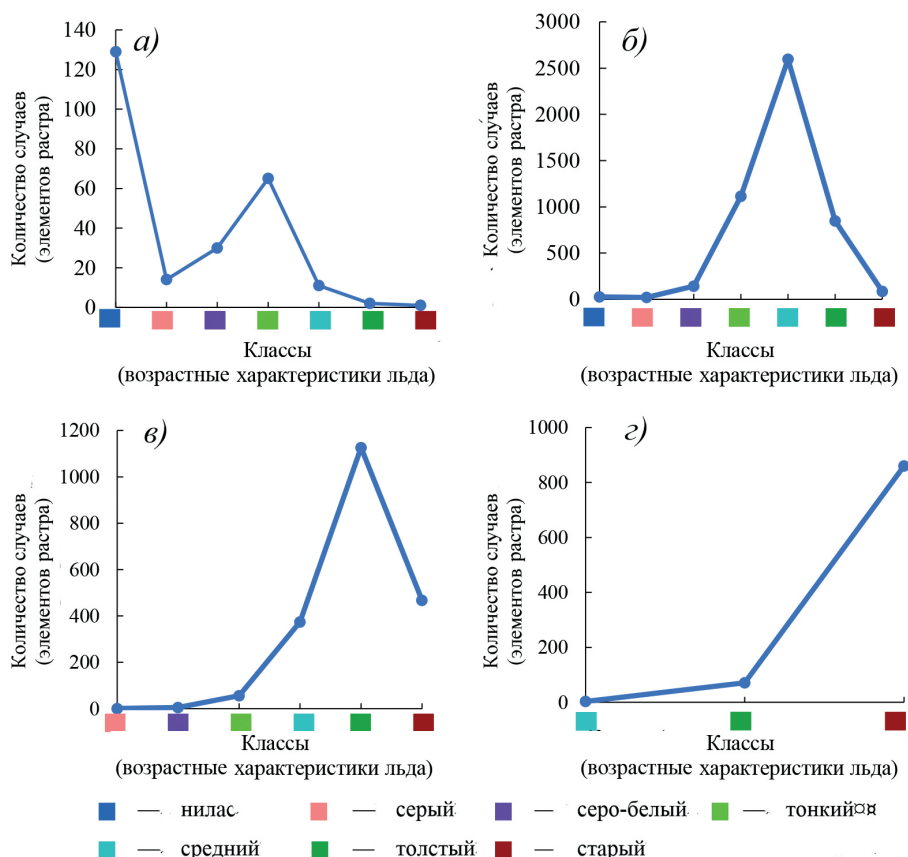


Рис. 5. Распределения элементов CryoSat-2 & SMOS для разных классов (март, 2010–2018 гг.): а) — нилас, б) — средний лед, в) — толстый лед, з) — старый лед

Fig. 5. Distribution of CryoSat-2 & SMOS elements over different classes (March, 2010–2018): а) — nilas, б) — medium first-year ice, в) — thick first-year ice, з) — old ice

Толстый лед также надежно распознается на основе использования комбинации CryoSat-2 & SMOS с января по март с варьирующим $Proc_{rec}$: 77 % (январь), 84 % (февраль), 55 % (март). Также возможно использование трех критериев распознавания, StD попадает в интервал [0,32; 0,55].

Старый лед показывает самые высокие $Proc_{rec}$ в феврале–апреле на основе использования комбинации спутниковых данных: 91 % (февраль), 92 % (март), 87 % (апрель). Кроме того, возможно использование трех критериев распознавания, StD попадает в узкий интервал [0,25; 0,31], меньший, чем при использовании данных CryoSat-2 для распознавания этой же возрастной стадии.

С помощью радиометрических данных SMOS распознается нилас, тонкий и средний лед, в зависимости от месяца. Поэтому в контексте Карского моря значение Ice_{thick} — скользящее от 0,5 м до 1 м (1 м — крайнее значение границы неопределенности [14]).

Хотя программа CryoSat-2 в первую очередь предназначалась для измерения толщины многолетнего льда, но в контексте Карского моря ее также можно использовать для определения толщины однолетнего (толстого и, в отдельные месяцы, и среднего) льда. В отношении остальных возрастных стадий льда Карского моря альтиметрический метод показывает значительную неопределенность, которая может быть заполнена данными SMOS и комбинацией CryoSat-2 & SMOS для ниласа, тонкого однолетнего льда и, в отдельные месяцы, среднего льда.

Также использованные данные могут быть дополнены данными лазерного высотомера Ice, Cloud и Land Elevation 2 (ICESat-2, с 2018), который имеет одинаковые с CryoSat-2 модальную толщину и распределение толщин, что позволяет предположить, что два независимых прибора могут предоставлять последовательную, но взаимодополняющую информацию [8, 11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сложность ледовых условий и их влияние на различные виды морской деятельности в основном связаны с колебаниями площадей ледяных массивов, которые подвержены не только межгодовой, но и климатической изменчивости. Прохождение трассы и работа судов в водах Российской Арктики должны быть безопасными как для них, так и для экологии региона. Эти два аспекта ледовой навигации могут быть обеспечены хорошим знанием ледовых условий на трассе и способностью судна преодолевать льды без аварий. Для выполнения гидрографических работ необходимо иметь сведения о ледовых условиях не только на трассе перехода в район работ, но и на акватории самого района.

Поскольку стоит задача сделать проход по трассе СМП круглогодичным на всем пути, то особую актуальность приобретает использование всех возможных источников информации о толщине морского льда, которые могут помочь в гидрометеорологическом и навигационном обеспечении. Использование данных Cryosat-2, SMOS и их комбинации Cryosat-2 & SMOS может помочь в комплексном анализе всей доступной информации при обеспечении надежного доступа к арктическим ресурсам. Искомые спутниковые продукты демонстрируют соответствие толщинам морского льда Карского моря, в основном на основании модального критерия, что согласуется с предыдущими исследованиями [18], и могут быть использованы при разных типах ледовых условий [32]: легкий (SMOS, Cryosat-2 & SMOS), средний (Cryosat-2, SMOS, Cryosat-2 & SMOS), тяжелый (Cryosat-2, Cryosat-2 & SMOS).

Конфликт интересов. У авторов нет конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (рег. № 121031200178-8) при финансовой поддержке Российского Центра освоения Арктики (г. Салехард, Россия).

Благодарности. Авторы выражают благодарность В.М. Смоляницкому за консультации при работе с объектами портала ААНИИ. Обработка данных CryoSat-2 (толщина льда) финансируется Министерством экономики и энергетики Германии (грант: 50EE1008). Обработка данных SMOS и CryoSat-2 & SMOS (толщина льда) финансируется проектом ESA SMOS & CryoSat-2 Sea Ice Data Product Processing and Dissemination Service. Для получения данных за период 01.10.2010 — 30.04.2018 использован портал <https://www.meereisportal.de>, последний доступ: 01.08.2022 (грант: REKLIM-2013-04)

Competing interests. The authors have no competing interests.

Funding. This work was carried out within the framework of the Research Program of IWEF SB RAS (Project 121031200178-8) and funded by Russian Center for Arctic Development (Salekhard, Russia).

Acknowledgments. The authors wish to express their thanks to Vasily M. Smolyanitsky for expert advice in working with objects of the AARI portal. The processing of CryoSat-2 (sea ice thickness) data is funded by the German Ministry of Economic Affairs and Energy (grant: 50EE1008). The production of the SMOS sea ice thickness data and the combination of CryoSat-2 and SMOS data were funded by the ESA project SMOS & CryoSat-2 Sea Ice Data Product Processing and Dissemination Service. Data from 01.10.2010 to 30.04.2018 was obtained from <https://www.meereisportal.de> (grant: REKLIM-2013-04).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М., Фролов И.Е. Изменения морского ледяного покрова и других составляющих климатической системы в Арктике и Антарктике в связи с эволюцией полярных вихрей // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 1 (78). С. 48–58.
2. Walsh J.E., Fetterer F., Stewart J.S., Chapman W.L. A database for depicting Arctic sea ice variations back to 1850 // Geographical Review. 2017. V. 107 (1). P. 89–107. doi: 10.1111/j.1931-0846.2016.12195.x.
3. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021. 2391 p. doi: 10.1017/9781009157896.
4. Kwok R. Arctic sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: Losses and coupled variability (1958–2018) // Environ. Res. Lett. V. 13. 105005. doi: 10.1088/1748-9326/aae3ec.
5. Lindsay R., Schweiger A. Arctic sea ice thickness loss determined using subsurface, aircraft, and satellite observations // The Cryosphere. 2015. V. 9 (1). P. 269–283. doi:10.5194/tc-9-269-2015.
6. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.П., Клячкин С.В., Фролов С.В. Морской лед // Методы оценки последствий изменений климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет, 2012. С. 400–429.

7. 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.

8. Moon T.A., Druckenmiller M.L., Thoman R.L. Eds. Arctic Report Card 2021. National Oceanic and Atmospheric Association 2021. URL: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/34308> (дата обращения: 16.08.2022).

9. Tschudi M.A., Stroeve J.C., Stewart J.S. Relating the Age of Arctic Sea Ice to its Thickness, as Measured during NASA's ICESat and IceBridge Campaigns // Remote Sensing. 2016. V. 8 (6). P. 457. doi: 10.3390/rs8060457.

10. Zygmuntovska M. Arctic sea ice altimetry — Advances and current uncertainties. PhD thesis. Bergen: University of Bergen. 2014: 90 p.

11. Thoman R. L.; J. Richter-Menge and M.L. Druckenmiller, Eds. Arctic Report Card 2020. National Oceanic and Atmospheric Association 2020. URL: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/27827> (дата обращения: 16.08.2022).

12. Ricker R., Hendricks S., Helm V., Skourup H., Davidson M. Sensitivity of CryoSat-2 Arctic sea-ice freeboard and thickness on radar-waveform interpretation // The Cryosphere. 2014. V. 8. P. 1607–1622. doi: 10.5194/tc-8-1607-2014.

13. 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 (3). P. 997–1018. doi: 10.5194/tc-8-997-2014.

14. 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. P. 1607–1623. doi: 10.5194/tc-11-1607-2017.

15. Экологическая ценность и уязвимость зоны кромки льда / Ред. Сесилие Х. фон-Квильфельт // Краткий отчет Норвежского полярного института № 47. 2018. 286 с. URL: https://www.barentsportal.com/documents/MIZ_RU.pdf (дата обращения: 16.08.2022).

16. Ronkainen I., Lehtiranta J., Lensu M., Rinne E., Haapala J., Haas C. Interannual sea ice thickness variability in the Bay of Bothnia // The Cryosphere. 2018. V. 12. P. 3459–3476. doi: 10.5194/tc-12-3459-2018.

17. Смоляницкий В.М., Торяков А.Б., Фильчук К.В., Фролов И.Е. Сравнительный анализ прямых измерений толщин льда и высот снега, наблюдений Cryosat-2 и численных оценок системы PIOMAS // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 3. С. 337–348. doi: org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-337-348.

18. Belter H.J., Krumpfen T., Hendricks S., Hoелеmann J., Janout M.A., Ricker R., Haas C. Satellite-based sea ice thickness changes in the Laptev Sea from 2002 to 2017: comparison to mooring observations // The Cryosphere. 2020. V. 14. P. 2189–2203. doi: 10.5194/tc-14-2189-2020.

19. Sea ice nomenclature. Terminology and codes // WMO. № 259. V. 1. Geneva, 2017. doi: 10.25607/OBP-1515.

20. Карклин В.П., Хотченков С.В., Юлин А.В., Смоляницкий В.М. Сезонные изменения возрастного состава льдов в северо-восточной части Карского моря в осенне-зимний период // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 4 (110). С. 41–50.

21. Карклин В.П., Хотченков С.В., Юлин А.В., Смоляницкий В.М. Формирование возрастного состава льда в юго-западной части Карского моря в осенне-зимний период // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 3 (113). С. 16–26. doi: 10.30758/0555-2648-2017-0-3-16-26.

22. Richter-Menge J., Druckenmiller M.L., Jeffries M. Eds. 2019: Arctic Report Card 2019. URL: <https://arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2019/ArtMID/7916/ArticleID/837/About-Arctic-Report-Card-2019> (дата обращения: 16.08.2022).

23. Атлас ледяных образований / Под общей редакцией В.М. Смоляницкого. СПб.: ААНИИ, 2019. 232 с.
24. Gray L., Burgess D., Copland L., Langley K., Gogineni P., Paden J., Leuschen C., van As D., Fausto R., Joughin I., Smith B. Measuring Height Change Around the Periphery of the Greenland Ice Sheet With Radar Altimetry // *Frontiers in Earth Science*. 2019. V. 7. P. 1–14. doi: 10.3389/feart.2019.00146.
25. Schröder D., Feltham D.L., Tsamados M., Ridout A., Tilling R. New insight from CryoSat-2 sea ice thickness for sea ice modelling // *The Cryosphere*. 2019. V. 13. P. 125–139. doi: 10.5194/tc-13-125-2019.
26. Ricker R., Kauker F., Schweiger A., Hendricks S., Zhang J., Paul S. Evidence for an Increasing Role of Ocean Heat in Arctic Winter Sea Ice Growth // *Journal of Climate*. 2021. V. 34 (13). P. 5215–5227. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0848.1>.
27. Wang X., Key J., Kwok R., Zhang J. Comparison of Arctic Sea Ice Thickness from Satellites, Aircraft, and PIOMAS Data // *Remote Sensing*. 2016. V. 8 (9). P. 713. doi: 10.3390/rs8090713.
28. Hendricks S., Ricker R., Paul S. Product User Guide & Algorithm Specification: AWI CryoSat-2 Sea Ice Thickness (version 2.4), 2021. URL: <https://epic.awi.de/id/eprint/54733/> (дата обращения: 16.08.2022).
29. Duda R., Hart P. Pattern Classification and Scene Analysis. NY.: John Willey & Sons, 1973. 284 p.
30. Полякова В.В., Шаброва Н.В. Основы теории статистики. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 148 с.
31. Реброва О.Ю. Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ STATISTICA. М.: МедиаСфера, 2002. 312 с.
32. Иванов Р.В., Полубелов Д.А., Соболева А.А. Характеристика ледовых условий работы гидрографических судов в Карском море // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. 2018. Т. 10. № 6. С. 1211–1224. doi: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1211-1224.

REFERENCES

1. Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev Ye.G., Smolyanitsky V.M., Frolov I.E. Changes of sea ice cover and other climatic system components in the Arctic and the Antarctic related to evolution of polar eddies. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2008, 1 (78): 48–58. [In Russian].
2. Walsh J.E., Fetterer F., Stewart J.S., Chapman W.L. A database for depicting Arctic sea ice variations back to 1850. *Geographical Review*. 2017, 107 (1): 89–107. doi: 10.1111/j.1931-0846.2016.12195.x.
3. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021: 2391 p. doi: 10.1017/9781009157896.
4. Kwok R. Arctic sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: Losses and coupled variability (1958–2018). *Environmental Research Letters*. 2018, 13: 105005. doi: 10.1088/1748-9326/aae3ec.
5. Lindsay R., Schweiger A. Arctic sea ice thickness loss determined using subsurface, aircraft, and satellite observations. *The Cryosphere*. 2015, 9 (1): 269–283. doi: 10.5194/tc-9-269-2015.
6. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Smolianitskii V.P., Kliachkin S.V., Frolov S.V. Sea ice. Methods for assessing the effects of climate change on physical and biological systems. Moscow: Rosgidromet, 2012: 400–429. [In Russian].

7. Afanasieva E.V., Alekseeva T.A., Sokolova J.V., Demchev D.M., Chufarova M.S., Bychenkov Yu.D., Devyataev O. S. Methodology for compiling ice maps of the AARI. *Rossiyskaja Arktika*. Russian Arctic. 2019, 7: 5–20. doi: 10.24411/2658-4255-2019-10071.
8. Moon T.A., Druckenmiller M.L., Thoman R.L. Eds. Arctic Report Card 2021. National Oceanic and Atmospheric Association 2021. Available at: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/34308> (accessed 16.08.2022).
9. Tschudi M.A., Stroeve J.C., Stewart J.S. Relating the age of Arctic Sea ice to its thickness, as measured during NASA's ICESat and IceBridge campaigns. *Remote Sensing*. 2016, 8 (6): 457. doi: 10.3390/rs8060457.
10. Zygmuntovska M. Arctic sea ice altimetry — Advances and current uncertainties. PhD thesis. Bergen: University of Bergen, 2014: 90 p.
11. Thoman R.L.; J. Richter-Menge and M.L. Druckenmiller, Eds. Arctic Report Card 2020. National Oceanic and Atmospheric Association 2020. Available at: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/27827> (accessed 16.08.2022).
12. Ricker R., Hendricks S., Helm V., Skourup H., Davidson M. Sensitivity of CryoSat-2 Arctic sea-ice freeboard and thickness on radar-waveform interpretation. *The Cryosphere*. 2014, 8: 1607–1622. doi: 10.5194/tc-8-1607-2014.
13. 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, 8 (3): 997–1018. doi: 10.5194/tc-8-997-2014.
14. 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, 11: 1607–1623. doi: 10.5194/tc-11-1607-2017.
15. Sesilie Kh. fon-Kvil'fel'č. *Kratkii otcet Norvezhskogo poliarnogo instituta*. Summary report of the Norwegian Polar Institute. 2018, 47: 286 p. Available at: https://www.barentsportal.com/documents/MIZ_RU.pdf (accessed 16.08.2022). [In Russian].
16. Ronkainen I., Lehtiranta J., Lensu M., Rinne E., Haapala J., Haas C. Interannual sea ice thickness variability in the Bay of Bothnia. *The Cryosphere*. 2018, 12: 3459–3476. doi: 10.5194/tc-12-3459-2018.
17. Smolyanitsky V.M., Turyakov A.B., Filchuk K.V., Frolov I.E. Comparison of direct measurements of sea ice thickness and snow height, CryoSat-2 observations and PIOMAS numerical estimates. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (3): 337–348. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-337-348>. [In Russian].
18. Belter H.J., Krumpfen T., Hendricks S., Hoелеmann J., Janout M.A., Ricker R., Haas C. Satellite-based sea ice thickness changes in the Laptev Sea from 2002 to 2017: comparison to mooring observations. *The Cryosphere*. 2020, 14: 2189–2203. doi: 10.5194/tc-14-2189-2020, 2020.
19. Sea ice nomenclature. Terminology and codes. WMO. № 259. V. 1. Geneva, 2017. doi: 10.25607/OBP-1515
20. Karklin V.P., Hotchenkov S.V., Yulin A.V., Smolyanitsky V.M. Seasonal changes in the stages of sea ice development in northeast part of the Kara sea during the autumn and winter period. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2016, 110 (4): 41–50. [In Russian].
21. Karklin V.P., Hotchenkov S.V., Yulin A.V., Smolyanitsky V.M. Formation of the stages of sea ice development composition in the south-western part of the Kara sea during autumn-winter season. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2017, 113 (3): 16–26. doi: 10.30758/0555-2648-2017-0-3-16-26. [In Russian].
22. Richter-Menge J., Druckenmiller M.L., Jeffries M. Eds. 2019: Arctic Report Card 2019. Available at: <https://arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2019/ArtMID/7916/ArticleID/837/About-Arctic-Report-Card-2019> (accessed 16.08.2022).

23. *Atlas ledjanyh obrazovanij. Ed. V. Smolyanitsky.* Atlas of ice formations. Ed. V. Smolyanitsky. St. Petersburg: Arctic and Antarctic Research Institute, 2019: 232 p. [In Russian].
24. Gray L., Burgess D., Copland L., Langley K., Gogineni P., Paden J., Leuschen C., van As D., Fausto R., Joughin I., Smith B. Measuring height change around the periphery of the Greenland Ice Sheet with radar altimetry. *Frontiers in Earth Science.* 2019, 7: 1–14. doi: 10.3389/feart.2019.00146.
25. Schröder D., Feltham D.L., Tsamados M., Ridout. A., Tilling R. New insight from CryoSat-2 sea ice thickness for sea ice modelling. *The Cryosphere.* 2019, 13: 125–139. doi: 10.5194/tc-13-125-2019.
26. Ricker R., Kauker F., Schweiger A., Hendricks S., Zhang J., Paul S. Evidence for an increasing role of Ocean heat in Arctic winter sea ice growth. *Journal of Climate.* 2021, 34 (13): 5215–5227. doi: 10.1175/JCLI-D-20-0848.1.
27. Wang X., Key J., Kwok R., Zhang J. Comparison of Arctic Sea Ice Thickness from Satellites, Aircraft, and PIOMAS Data. *Remote Sensing.* 2016, 8 (9):713. doi: 10.3390/rs8090713.
28. Hendricks S., Ricker R., Paul S. Product User Guide & Algorithm Specification: AWI CryoSat-2 Sea Ice Thickness (version 2.4). 2021. URL: <https://epic.awi.de/id/eprint/54733/> (дата обращения: 16.08.2022).
29. Duda R., Hart P. Pattern Classification and Scene Analysis. NY.: John Willey & Sons, 1973: 284 p.
30. Poliakova V.V., Shabrova N.V. *Osnovy teorii statistiki.* Fundamentals of Statistical Theory. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta, 2015: 148 p. [In Russian].
31. Rebrova O.Iu. *Statisticheskij analiz medicinskih dannyh. Primenenie paketa prikladnyh programm STATISTICA.* Statistical analysis of medical data. Application of the STATISTICA application package. Moscow: MediaSfera, 2002: 312 p. [In Russian].
32. Ivanov R.V., Polubelov D.A., Soboleva A.A. Ice condition features of hydrographic vessels for work in the Kara Sea. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova.* Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov. 2018, 10 (6): 1211–1224. doi: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1211-1224. [In Russian].