

# Морские, речные и озёрные льды

УДК 551.46.062.7

doi: 10.31857/S2076673420020037

## Изменчивость морского льда в Арктике по данным Арктического портала

© 2020 г. Е.В. Заболотских\*, К.С. Хворостовский, Е.А. Балашова,  
С.М. Азаров, В.Н. Кудрявцев

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия  
\*liza@rshu.ru

## Variability of sea ice in the Arctic according to the Arctic Portal

E.V. Zabolotskikh\*, K.S. Khvorostovsky, E.A. Balashova,  
S.M. Azarov, V.N. Kudryavtsev

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia  
liza@rshu.ru

Received January 16, 2019 / Revised March 11, 2019 / Accepted June 13, 2019

**Keywords:** *Arctic Portal, satellite data, sea ice monitoring in the Arctic.*

### Summary

The Arctic Portal of the Laboratory of Satellite Oceanography of the Russian State Hydrometeorological University is an open geo-informational system designed for operational monitoring of the sea ice–ocean–atmosphere system in the Arctic. Possibilities to use the Arctic Portal for the Arctic sea ice monitoring on the basis of satellite data, as well as the types of satellite measurements suitable for studying the properties of sea ice: active and passive microwave data; data of spectral radiometers in the infrared (IR) and visible ranges are considered. Every type of satellite data has certain limitations. For the study of sea ice the most suitable are the all-season remote sensing data – measurements of microwave instruments, independent of clouds and time of a day. Existing in the world resources of the sea ice maps and satellite data on sea ice are either closed for users or limited in their informational content. Several types of satellite data are currently available on the Arctic portal: Sentinel-1 synthetic aperture radar (SAR) images, 8-day averaged MODIS reflectivity data, optical and IR MODIS data of original time and spatial resolution, Norwegian Meteorological University sea ice maps, and data on consolidation of sea ice, based on passive microwave radiometer measurements. Some data is additionally available in the test mode. The effectiveness of combined use of various satellite data on the sea ice is proved by the examples of sea ice analyses.

**Citation:** Zabolotskikh E.V., Khvorostovsky K.S., Balashova E.A., Azarov S.M., Kudryavtsev V.N. Variability of sea ice in the Arctic according to the Arctic Portal. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2020. 60 (2): 239–250. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420020037.

*Поступила 16 января 2019 г. / После доработки 11 марта 2019 г. / Принята 13 июня 2019 г.*

**Ключевые слова:** *Арктический портал, мониторинг морского льда в Арктике, спутниковые данные.*

Представлены возможности Арктического портала (геоинформационного сервиса) для мониторинга ледяного покрова Арктики на основе спутниковых данных. Дан обзор основных типов спутниковых инструментов, позволяющих изучать морской лёд. Обоснована эффективность совместного применения результатов обработки разных спутниковых данных, имеющихся в среде геосервиса.

### Введение

Оперативные данные о ледяном покрове Арктики позволяют исследовать характеристики морских льдов, изучать ледовый режим и обеспечивать безопасность и эффективность судоходства, в том числе на трассах Северного морского пути [1]. Использование спутниковых

измерений в различных диапазонах электромагнитного спектра разного пространственного и временного разрешения – основной метод изучения арктических льдов, так как только с их помощью можно получить пространственное распределение характеристик морского льда. Крупнейшие зарубежные центры обработки, хранения и распространения спутниковых дан-

ных работают с измерениями, преобразуя их в спутниковые продукты — данные разного уровня обработки. В настоящее время на солнечно-синхронных орбитах вокруг Земли вращаются десятки метеорологических спутников, обеспечивая регулярное покрытие Арктики измерениями с высоким временным разрешением. Данные большинства из них предоставляются бесплатно, однако при их использовании возникает ряд проблем, которые осложняют анализ морского льда и затрудняют возможность его оперативного мониторинга. Эти проблемы связаны со сложным доступом к данным, с их различными форматами и геопривязкой, а также с необходимостью применения специального программного обеспечения. Часть проблем решается путём предоставления данных в среде готовых геосервисов, позволяющих отобразить состояние ледяного покрова на карте.

Разработанный в Лаборатории спутниковой океанографии (ЛСО) Российского государственного гидрометеорологического университета геосервис Арктический портал ЛСО (Портал) — это инструмент мониторинга и прогноза состояния окружающей среды в Арктическом регионе на основе спутниковых данных и результатов модельных расчётов. Портал представляет собой геоинформационную систему, работающую в полярной сферографической проекции, реализованную как доступное веб-приложение (<http://siows.com>) для отображения полей геофизических параметров атмосферы, океана и морского льда. В настоящей статье даётся обзор типов спутниковых измерений, позволяющих изучать морской лёд, а также ледовые спутниковые продукты и их ресурсы. Описаны также возможности Арктического портала ЛСО применительно к использованию этих данных при исследовании морского льда в Арктике.

### **Спутниковые данные, используемые для изучения морского льда в Арктике**

Методы спутникового дистанционного зондирования различаются по типу локации (активное, пассивное зондирование) и диапазону электромагнитного спектра (видимый, инфракрасный и микроволновый). Для получения

информации о ледяном покрове могут использоваться все перечисленные типы данных, и каждый из них имеет свои преимущества и ограничения. Так, измерения в микроволновом диапазоне не зависят от солнечного освещения, и их интерпретация возможна в условиях облачности. Отдельно выделяются данные радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) высокого пространственного разрешения [2]. Радиолокаторы измеряют удельную эффективную площадь рассеяния (УЭПР), имеющую разные характеристики для воды и различных типов льда. Это позволяет разделять лёд и воду и классифицировать типы льда [3]. Данные скаттерометров используются, как правило, для построения регулярных карт протяжённости ледяного покрова низкого пространственного разрешения [4]. Измерения РСА применяют для построения карт морского льда и его детальной классификации [5]. С использованием последовательных РСА-изображений рассчитываются поля дрейфа морского льда [6]. Благодаря высокому разрешению на таких снимках отчётливо устанавливаются особенности ледяных полей, а различия между льдом и водой определяются с высокой точностью методом визуального анализа изображений [7]. Даже без экспертной классификации и автоматической обработки снимки полей УЭПР морского льда позволяют изучать динамику и изменчивость морского льда, особенности его трансформации, дрейфа, замерзания и таяния. К сожалению, этот вид анализа плохо автоматизируется, хотя некоторые региональные алгоритмы демонстрируют неплохие результаты классификации [8].

В настоящее время Европейское космическое агентство (European Space Agency — ESA) предоставляет свободный доступ к данным двух европейских спутников с РСА-аппаратурой — Sentinel-1A и Sentinel-1B. Эти данные открывают беспрецедентные возможности для изучения динамики и свойств морского льда, хотя они и не обеспечивают ежедневное полное покрытие Арктического региона. В среднем можно рассчитывать на один снимок за 3–4 дня для любой точки, хотя некоторые области (например, Северо-Европейский бассейн) имеют ежедневное покрытие. Ещё одна сложность в использовании именно этих данных для оперативного мониторинга — ресурсоёмкость

любых алгоритмов на базе РСА-данных. Поскольку данные имеют высокое разрешение, каждая гранула характеризуется немалым размером, поэтому только загрузка полного набора данных и их перепроецирование могут занять достаточно много времени.

Данные спектральных радиометров, измеряющих интенсивность отражённого солнечного света, позволяют при безоблачной погоде получать высокодетальные изображения поверхности. На таких снимках изображение льда близко к воспринимаемому человеческим глазом, а разделение на лёд и воду основано на различиях альбедо этих сред [9]. Правда, возможности выполнения таких измерений в Арктике ограничены: во-первых, во время полярной ночи данные получить нельзя; во-вторых, ясная погода в полярных районах бывает очень редко. Измерения в ИК-диапазоне, в отличие от видимого, не имеют ограничений, связанных с длиной светового дня, но присутствие облаков также препятствует получению информации о поверхности. Физическая основа разделения льда и воды на основе ИК-измерений – разница в температурах их поверхности [10]. ИК-снимки для картирования морского льда не получили широкого распространения из-за больших погрешностей.

Спутниковые спектральные радиометры имеют большое число каналов измерений и сравнительно высокое пространственное разрешение (от нескольких сотен метров для каналов видимого диапазона до ~1 км для каналов ИК-диапазона). Существуют десятки спутниковых платформ со спектральными радиометрами, включая несколько российских (Метеор-М № 2, Ресурс-П, Канопус-В). Один из широко используемых инструментов – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (*MODIS*) на борту американских спутников Terra и Aqua с 2000 г. проводит регулярную съёмку земной поверхности в 36 спектральных каналах в полосе обзора ~2330 км [11]. Для повышения информативности данных в условиях облачности НАСА (National Aeronautics and Space Administration) создаёт продукты разного временного осреднения [12], что позволяет получать квазибезоблачные изображения поверхности, которые также используют при картировании морского льда [13].

Измерения микроволновых радиометров дают возможность восстанавливать такие параметры морского льда, как его сплочённость и тип [14]. Широкий пространственный охват, регулярность, независимость от облачности и продолжительность калиброванных измерений – залог использования этих данных при изучении изменений климата [15]. Среди десятка различных методов восстановления сплочённости ледяного покрова [16] особый интерес вызывают методы картирования морского льда с использованием измерений вблизи 90 ГГц, позволяющие строить карты льда с разрешением несколько километров [17]. Например, при измерениях с помощью японского микроволнового радиометра Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2) можно достигнуть разрешения 3 км [18].

#### **Существующие ресурсы ледовых карт и спутниковых продуктов по морскому льду**

Ни один тип спутниковых данных не позволяет проводить всесторонний мониторинг морского льда на регулярной основе. Данные РСА – нерегулярны, а оптические снимки бесполезны в условиях облачности. Микроволновые радиометры обеспечивают регулярное покрытие Арктики измерениями, интерпретация которых не зависит от облачности, но имеют низкие пространственные разрешения. Вместе с тем, имея все эти данные и продукты их обработки, можно получить достаточно много информации для оперативного мониторинга и изучения ледовой обстановки. В настоящее время карты базовых характеристик морского льда (сплочённость, форма, возраст) создаются и/или архивируются в таких крупнейших центрах обработки спутниковой информации, как Американский национальный центр данных по снегу и льду (National Snow and Ice Data Center – NSIDC), Европейский центр (EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility – OSI SAF), Канадская ледовая служба (Canadian Ice Service – CIS), Норвежская ледовая служба (Norwegian Ice Service – NIS), Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ). Основой для построения ледовых карт служат спутниковые данные, дополнен-

ные судовыми, авиационными и стационарными наблюдениями и обобщённые ледовыми экспертами [9]. Несмотря на ценность этих информационных ресурсов, большинство из них имеют ограничения, затрудняющие их практическое использование. Эти ограничения связаны с масштабами временного усреднения, информационным содержанием и/или низким пространственным разрешением.

Так, карты ААНИИ для всей Арктики – одни из самых надёжных ресурсов информации о типах и сплочённости морского льда в Арктике. Эти карты создаются высококвалифицированными специалистами на основе экспертного анализа всех имеющихся спутниковых и контактных измерений [1]. Однако общедоступные карты имеют временные и информационные ограничения. Они содержат средние данные за семь дней ([http://www.aari.ru/odata/\\_d0015.php?lang=0](http://www.aari.ru/odata/_d0015.php?lang=0)). Летом ледовые карты ААНИИ отражают только распределение льда по обобщённым градациям сплочённости, а зимой – по обобщённым градациям возраста (типа). Аналогичные семидневные ледовые карты выпускают и NIS (для Арктики и Антарктики), и CIS (для района Канадской Арктики). Научно-исследовательский центр (НИЦ) «Планета» создаёт карты ледовой обстановки в виде специализированного геосервиса. Отличительная особенность картографического веб-сервиса «НИЦ «Планета» – представление данных в виде мультимасштабного продукта, позволяющего в разных масштабах получать разные виды информации: например, в мелком масштабе отображается кромка льда, в среднем – карта распределения припая и плавучего льда, в среднем и крупном – карта ледовой обстановки с информацией о типе, сплочённости, возрасте и форме льда [19]. Подобный же сервис предоставляет и ААНИИ коммерческим компаниям, заинтересованным в безопасности навигации и нефте- и газодобывающей деятельности. Воспользоваться этими сервисами для научных исследований на бесплатной основе невозможно, как и многофункциональными гео-сервисами российского лидера в сфере спутникового мониторинга – компании СКАНЭКС.

Европейская ледовая служба (OSI SAF) через организацию партнёра Norwegian Meteorological Institute (Норвежский метеорологический ин-

ститут – НМИ) создаёт карты морского льда для морей Северо-Европейского бассейна. Методика составления карт включает в себя: обобщение исходных данных за предыдущие несколько суток ледовым экспертом; выделение и нанесение на карту границ однородных зон по общей и частным сплочённостям льда и возрастным градациям. Бесплатно доступны карты среднесуточных обобщённых градаций сплочённостей с разрешением 1 км. Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) представляет собой систему для доступа к ресурсам морских информационных систем, включая большое разнообразие карт характеристик морского льда (<http://esimo.ru/portal>). К информационным ресурсам ЕСИМО относятся данные ведомственных информационных систем морской направленности, в том числе Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации-Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД), аккумулирующего и распространяющего данные российских и зарубежных институтов, среди которых карты ААНИИ, «НИЦ «Планета» и др. Однако ни один из существующих ресурсов не позволяет выполнять комплексный анализ морского льда в Арктике с использованием свободно распространяемых спутниковых продуктов в среде геосервиса.

### Арктический портал

Представление спутниковой информации в среде геосервиса позволяет отобразить состояние ледяного покрова на карте. Арктический портал (Портал), разработанный в Лаборатории спутниковой океанографии РГГМУ – ГИС-система, реализованная как веб-приложение, работу с которой можно вести с помощью любого современного веб-браузера. Портал позволяет работать со спутниковыми данными разного пространственного и временного разрешения. Часть данных доступна для просмотра в архивном режиме, но основная функция Портала – оперативный мониторинг состояния Арктики. Поскольку Портал использует сторонние источники спутниковых данных, его оперативность лимитируется временем появления данных на сайтах ресурсов. В настоящее время Портал ис-



пользует все описанные в предыдущем разделе типы данных дистанционного зондирования, позволяющие изучать морской лёд:

1) данные PCA Sentinel-1 A/B высокого пространственного разрешения (источник данных уровня L1 – <https://scihub.copernicus.eu/dhus>);

2) восьмидневные RGB (оптические) карты MODIS с пространственным разрешением 500 м (источник продуктов MOD09 и MYD09 – <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>);

3) оптические и ИК-снимки MODIS оригинального пространственного и временного разрешения (1 км для ИК, 250 м для видимых изображений, источник продуктов MOD021KM и MYD021KM – <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>);

4) карты морского льда Норвежского метеорологического института для морей Северо-Атлантического бассейна (источник данных – <https://thredds.met.no>);

5) среднесуточный продукт Университета Бремена по сплочённости морского льда по данным AMSR-E, AMSR2 с пространственным разрешением 6,25 км (источник данных – <http://www.iup.uni-bremen.de>);

6) среднесуточный продукт ЛСО по сплочённости морского льда по данным AMSR2 с пространственным разрешением 3 × 3 км (источник данных уровня L1R, используемых для получения продукта – <ftp.gportal.jaxa.jp>);

7) в тестовом режиме – продукт ЛСО по классификации морской поверхности по типу лёд/вода на основе данных PCA Sentinel-1 A/B.

Портал, как и любой веб-сервис, состоит из программы, обеспечивающей работу пользовательского интерфейса и программ работы с данными. Используются библиотеки и OpenLayers (v4.6.5), React (v16.1), Flask и программные платформы Node.js, Python и PostgreSQL. Вся система работы с данными полностью автоматизирована, начиная с их загрузки и заканчивая отображением полей геофизических параметров или спутниковых измерений на Портале. Данные загружаются и обрабатываются специальными подпрограммами-обработчиками, зависящими от конкретного типа данных. Работа обработчиков может заключаться лишь в перепроецировании данных в полярную стереографическую проекцию (одна из наиболее удобных картографических проекций для изображения

всего региона Арктики). Возможно также применение различных алгоритмов для обработки спутниковых данных уровня Level 1, реализующих как общеизвестные методы восстановления геофизических параметров, так и оригинальные, разработанные в ЛСО. Например, обработчик, производящий спутниковый продукт по сплочённости морского льда по данным AMSR2, создаёт файлы, содержащие данные измерений радиояркостной температуры  $T_{я}$  микроволнового излучения на частоте 89 ГГц на регулярной сетке в полярной стереографической проекции, а затем рассчитывает среднесуточные значения  $T_{я}$ , по которым восстанавливается сплочённость льда с использованием алгоритма, разработанного в ЛСО. Все операции с данными, выполняемые для обеспечения оперативного мониторинга, ведутся в автоматическом режиме на серверах ЛСО. Система загрузки и обработки данных – распределённая и снабжена возможностями мониторинга ошибок и состояния.

Кроме отображения выбранных продуктов на карте, Портал даёт возможность работать с данными. В первую очередь, это настройка визуального представления данных – выбор цветовой схемы и диапазона шкалы для каждого снимка или всего продукта. Можно изменять прозрачность слоёв и порядок их наложения, настраивать вид самой карты, добавлять маску суши и карту глубин. На карту можно наносить (и при желании сохранять) различные объекты – отмечать интересующие точки или области для последующей работы, например, для визуального анализа дрейфа льда или оценки характеристик полыньи, разломов во льду и т.д. Можно посмотреть значение отображаемой величины и координату точки под курсором, построить график изменения величины вдоль сечения.

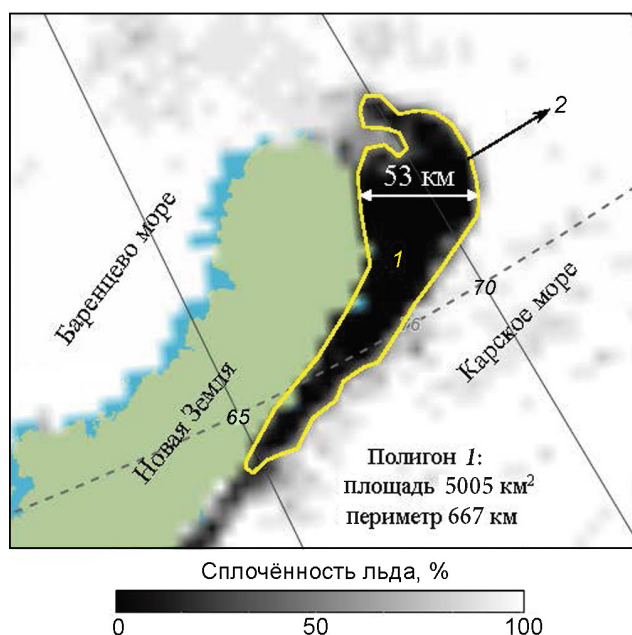
Для каждого набора данных, представленного на Портале, можно получить детальную информацию – пространственное разрешение, время съёмки, доступные каналы измерений и т.д. Помимо возможности работы с данными в браузере, Портал обеспечивает зарегистрированным пользователям возможность экспортировать данные с учётом выбранной даты и района. По специальному запросу доступна также возможность запуска процесса обработки архивных данных для выбранной даты и региона с возможностью отслеживания статуса выполнения зада-

чи через веб-интерфейс. После её завершения данные становятся доступными на портале для просмотра и скачивания. Портал также позволяет создавать базы данных идентифицированных объектов, следить за динамикой различных видов и форм морского льда, его дрейфом, оценивать проходимость льда и т.д. Все эти возможности обеспечивают удобство изучения состояния и динамики ледяного покрова.

### Использование Арктического портала для изучения морского льда

Полыньи в морях Арктики – основные зоны, где образуется молодой морской лёд зимой. Изучение их динамики на больших пространствах невозможно без спутниковых данных. С использованием Арктического портала установлено, что оценка устойчивости полыней и их характеристик в современном климате требует пересмотра. Так, Северная Новоземельская полынья считается устойчивой с повторяемостью более 50% [20]. Анализ карт среднесуточных значений сплочённости ледяного покрова показал, что в 2018 г. эта полынья не наблюдалась в течение двух месяцев – с начала марта до конца апреля. Возможности Портала при исследовании полыней показаны на рис. 1 на примере полыньи, образовавшейся к северо-востоку от Новой Земли под влиянием сильного юго-западного ветра с берега. Изображение поля сплочённости морского льда (среднесуточный продукт Университета Бремена по данным AMSR2) за 9 мая 2018 г. позволяет с помощью инструмента выделения полыньи (автоматически выделенный полигон 1) оценить её протяжённость и площадь. Максимальная ширина полыньи оценена вручную с помощью инструмента «линейка». Изображение поля сплочённости льда за предыдущий день (не представлено) позволяет оценить направление дрейфа льда (вручную установленный вектор разметки). По серии изображений можно проследить, что данная полынья образовалась 2 мая 2018 г. и просуществовала чуть более двух недель.

В настоящее время с помощью Портала ведётся работа по изучению динамики полыней в Карском море на основе данных по сплочённости морского льда, восстановленных по матери-

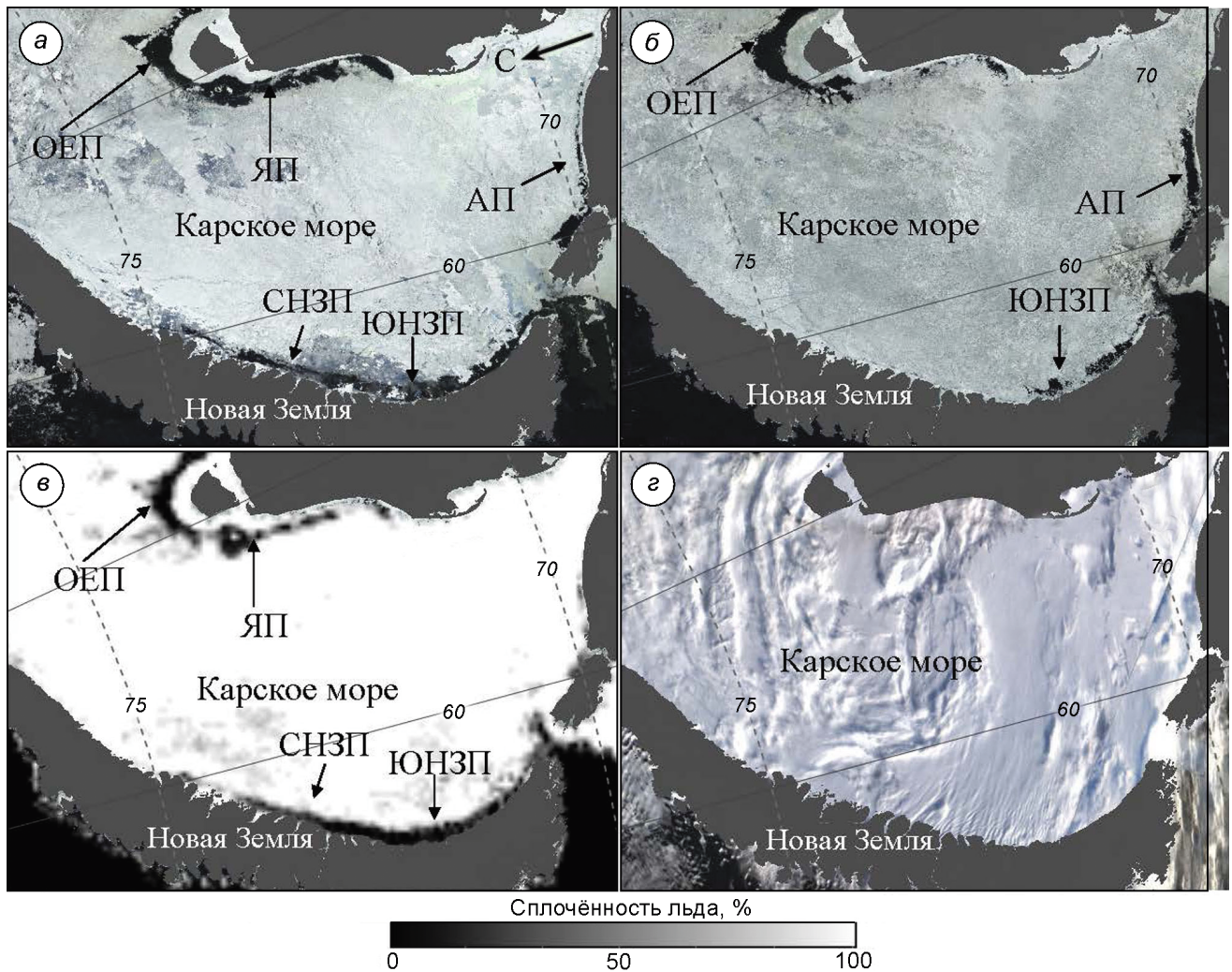


**Рис. 1.** Поле сплочённости морского льда по данным AMSR2 (среднесуточный продукт Университета Бремена) за 9 мая 2018 г.

Объекты на карте: полынья (автоматически выделенный полигон 1); вектор дрейфа льда 2 (вручную установленный вектор разметки); метка со значением ширины полыньи (53 км), измеренной с помощью инструмента «линейка»

**Fig. 1.** Sea ice concentration from AMSR2 data (daily averaged product of the University of Bremen), May 9, 2018. Objects on the map: West Severozemelskaya polynya (automatically selected polygon 1); sea ice drift vector 2 (manually set vector markup); the markup with a polynya width (53 km), measured with a tool «ruler»

алам AMSR-E и AMSR2 за период 2002–2018 гг. Рис. 2 демонстрирует возможность использования восьмидневных оптических данных MODIS с разрешением 500 м (см. рис. 2, а, б, в) для изучения динамики полыней в Карском море в июне 2018 г. Регулярные оптические снимки MODIS рассматриваемого района из-за превалирующей облачности не позволяют наблюдать за ледяным покровом (см. рис. 2, б). Среднесуточные карты сплочённости по данным AMSR2 можно использовать в качестве источника информации только для тех полыней, размеры которых превышают пространственное разрешение данного продукта (6,25 км). Так, Амдерминская полынья (АП) шириной меньше 2 км в поле сплочённости не идентифицируется (см. рис. 2, в). В то же время размеры Ямальской (ЯП), Обь-Енисейской (ОЕП), Северной Новоземельской (СНЗП) и Южной



**Рис. 2.** Восьмидневные композитные оптические изображения MODIS с разрешением 500 м: *а* – за 26 мая–2 июня 2018 г., *б* – за 3–10 июня 2018 г.; *в* – сплочённость льда по данным AMSR2 – среднесуточный продукт Университета Бремена с разрешением 6,25 км; *г* – изображение MODIS за 4 июня 2018 г. с разрешением 250 м. Полюны: АП – Амдерминская; ЯП – Ямальская; ОЕП – Обь-Енисейская; СНЗП – Северная Новоземельская; ЮНЗП – Южная Новоземельская

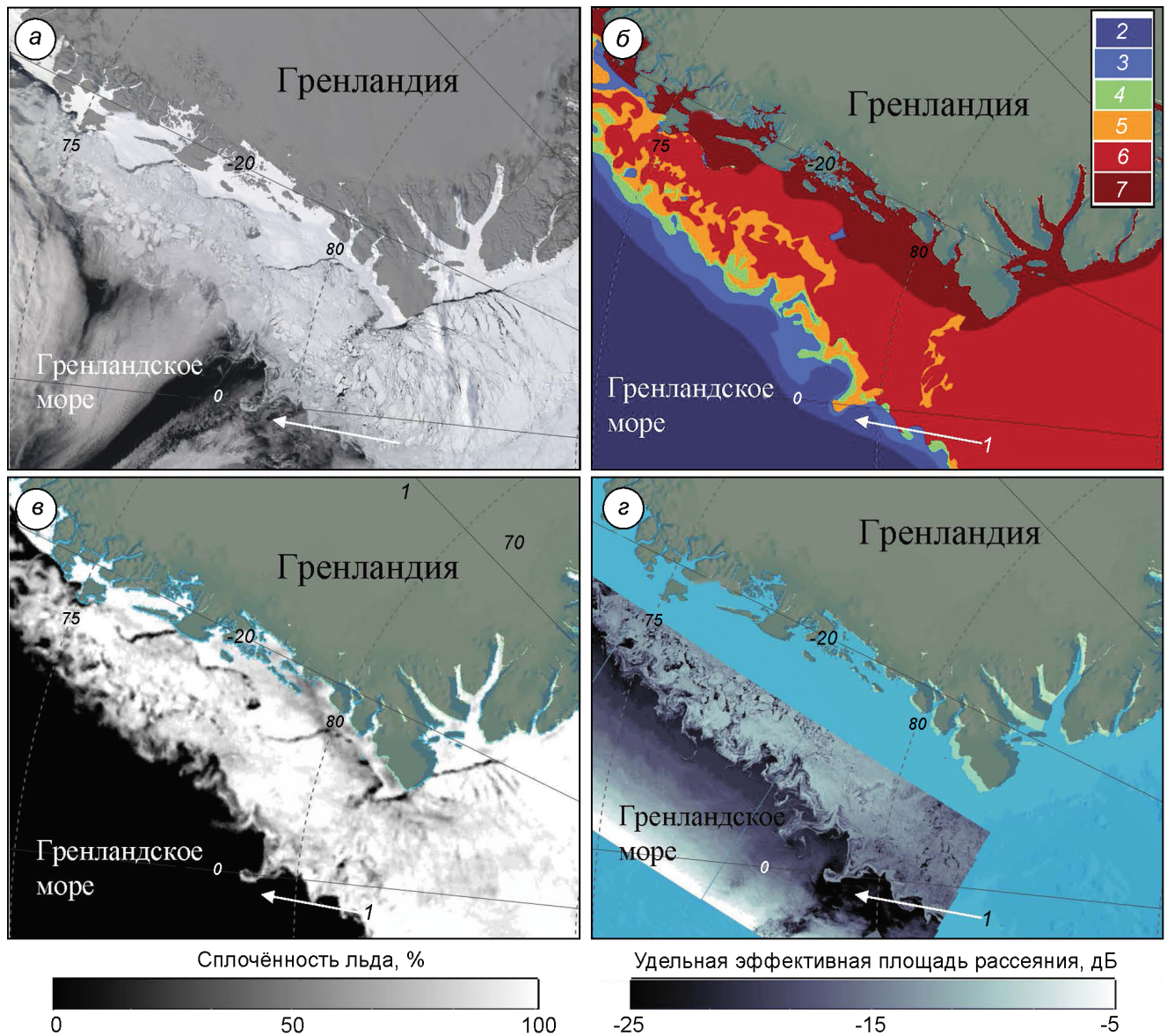
**Fig. 2.** 8-day averaged MODIS optical image with a resolution of 500 m: *a* – May 26–June 2, 2018, *б* – June 3–10, 2018; *в* – daily sea ice concentration, retrieved from AMSR2 data – satellite product of the University of Bremen a resolution of 6.25 km; *г* – MODIS images on June 4, 2018 a resolution of 250 m. Polynya: АП – Amdermink; ЯП – Yamal; ОЕП – Ob-Yenisei; СНЗП – Northern Novozemelskaya; ЮНЗП – South Novozemelskaya

Новоземельской (ЮНЗП) полыней достаточно велики, чтобы проследить динамику их характеристик с высоким временным (ежедневно), но низким пространственным разрешением по данным AMSR2.

Пример совместного использования карт ледяного покрова на основе различных спутниковых данных, доступных на Арктическом портале, представлен на рис. 3. Отсутствие облаков надо льдом в Гренландском море 30 мая 2018 г. (см. рис. 3, *а*) позволяет проанализировать со-

стояние ледяного покрова на оптическом снимке MODIS (хорошо выделяются зоны припая и крупно-битого льда разного возраста). Этот же снимок можно использовать для верификации карты среднесуточной балльности льда по классификации Норвежского метеорологического института (см. рис. 3, *б*) и по данным AMSR2 (см. рис. 3, *в*). Поскольку облачность частично закрывает поверхность моря в левой части снимка, точное положение кромки льда лучше определяется по данным радиолокаци-





**Рис. 3.** Лёд в Гренландском море 30 мая 2018 г. по данным мультисенсорного зондирования: *а* – оптическое изображение MODIS 08:45 Гр.; *б* – карта среднесуточной бальности льда по классификации Норвежского метеорологического института: 2 – вода (0–10%); 3 – редкий лёд (10–40%); 4 – разреженный лёд (40–70%); 5 – сжатый лёд (70–90%); 6 – сплочённый лёд (90–100%); 7 – припай (100%); *в* – сплочённость льда по данным AMSR2; *г* – радиолокационное изображение Sentinel-1A 07:37 Гр. Зона 1 – область, свободная от льда

**Fig. 3.** Multi-sensor data analysis of the sea ice in the Greenland Sea on May 30, 2018: *a* – MODIS optical image at 08:45 UTC; *б* – Norwegian Meteorological Institute daily averaged sea ice map: 2 – open water (0–10%); 3 – very open drift ice (10–40%); 4 – open drift ice (40–70%); 5 – close drift ice (70–90%); 6 – very close drift ice (90–100%); 7 – fast ice (100%); *в* – sea ice concentration from the AMSR2 data and (*г*) Sentinel-1A SAR image at 07:37 UTC. 1 – open water area

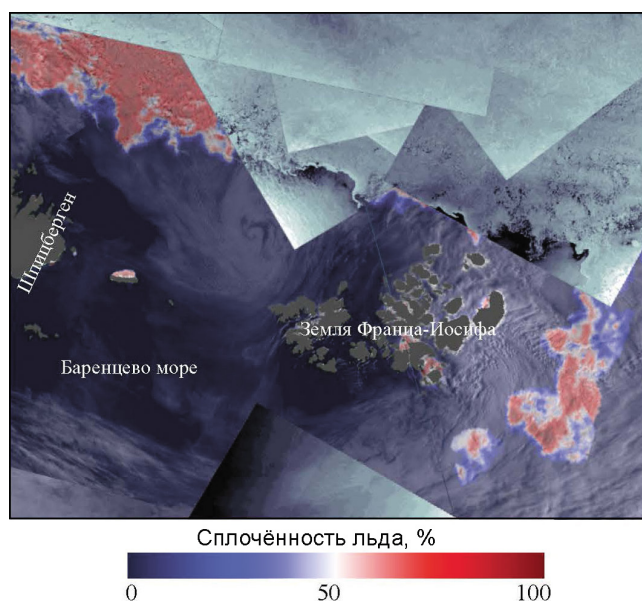
онного изображения Sentinel-1A (см. рис. 3, *г*). Область в верхней части снимка, где тон изображения меняется от светлого (слева) к более тёмному (справа), однозначно интерпретируется как вода, поскольку удельная эффективная площадь рассеяния морской воды при наличии ветра характеризуется существенной азимуталь-

ной анизотропией по сравнению с этой же характеристикой морского льда. Однако область однородного чёрного цвета внизу изображения (зона 1) можно интерпретировать и как поле ниласа, и как область абсолютного безветрия над морской водой. Лишь привлечение к анализу спутникового продукта по сплочённости

льда (см. рис. 3. в) позволяет классифицировать зону I как область, свободную ото льда.

Рис. 4 иллюстрирует развитие летнего мезомасштабного циклона к северо-западу от архипелага Земля Франца-Иосифа вблизи кромки морского льда. Слой сплочённости льда (продукт ЛСО) дан в цветовой схеме seismic и наложен на видимое изображение MODIS с прозрачностью 35%. Точное положение кромки идентифицируется по снимкам PCA Sentinel-1B с разрешением 40 м. В правой верхней части рис. 4, где наблюдаются облака и для которой отсутствуют снимки PCA, положение кромки можно определить по сплочённости льда с разрешением 3 км по данным AMSR2. В этом случае спутниковый продукт низкого пространственного разрешения дополняет данные высокого пространственного разрешения (Sentinel-1B и MODIS), обеспечивая картирование ледяного покрова там, где эти данные отсутствуют.

Рис. 5 иллюстрирует возможности Портала для тестирования существующих и новых спутниковых продуктов по морскому льду. На нём представлены результаты классификации морской поверхности по типу лёд/вода по данным PCA-снимков со спутника Sentinel-1 (см. рис. 5, а) с использованием нейронно-сетевого алгоритма, разработанного в Лаборатории спутниковой океанографии, и готовый продукт классификации Норвежской ледовой службы (см. рис. 5, в). Оценка качества автоматической классификации может быть получена на основании визуального анализа снимков УЭПР Sentinel-1 (см. рис. 5, б) и поля сплочённости льда по данным AMSR2 (см. рис. 5, г). Из рис. 5 видно, что соответствие результатов классификации (см. рис. 5, а) карте NIS (см. рис. 5, в) очень хорошее. Однако сравнение с полем сплочённости льда по данным AMSR2 (см. рис. 5, г) показывает неспособность алгоритма идентифицировать, например, Южную полынью Земли Франца-Иосифа, которая образуется с южной стороны острова Земля Георга и хорошо различается как в поле сплочённости по данным AMSR2, так и на исходных снимках PCA Sentinel-1 (см. рис. 5, б). Данная ошибка связана с тем, что сам нейронно-сетевой алгоритм настраивался с использованием карт NIS и поэтому унаследовал ошибки, присущие этим данным. Поэтому внедрение алгоритма автоматического разделения льда и



**Рис. 4.** Пример комплексного анализа состояния ледяного покрова и облачности над водной поверхностью 15 июля 2018 г. к северу от архипелага Земля Франца-Иосифа вблизи кромки морского льда.

Слой сплочённости льда с прозрачностью 35% дан в цветовой схеме seismic и наложен на видимое изображение MODIS. Сверху наложены доступные снимки PCA Sentinel-1B

**Fig. 4.** An example of a comprehensive analysis of the sea ice state and clouds over water on July 15, 2018 north off the Franz Josef Land Archipelago near the sea ice edge.

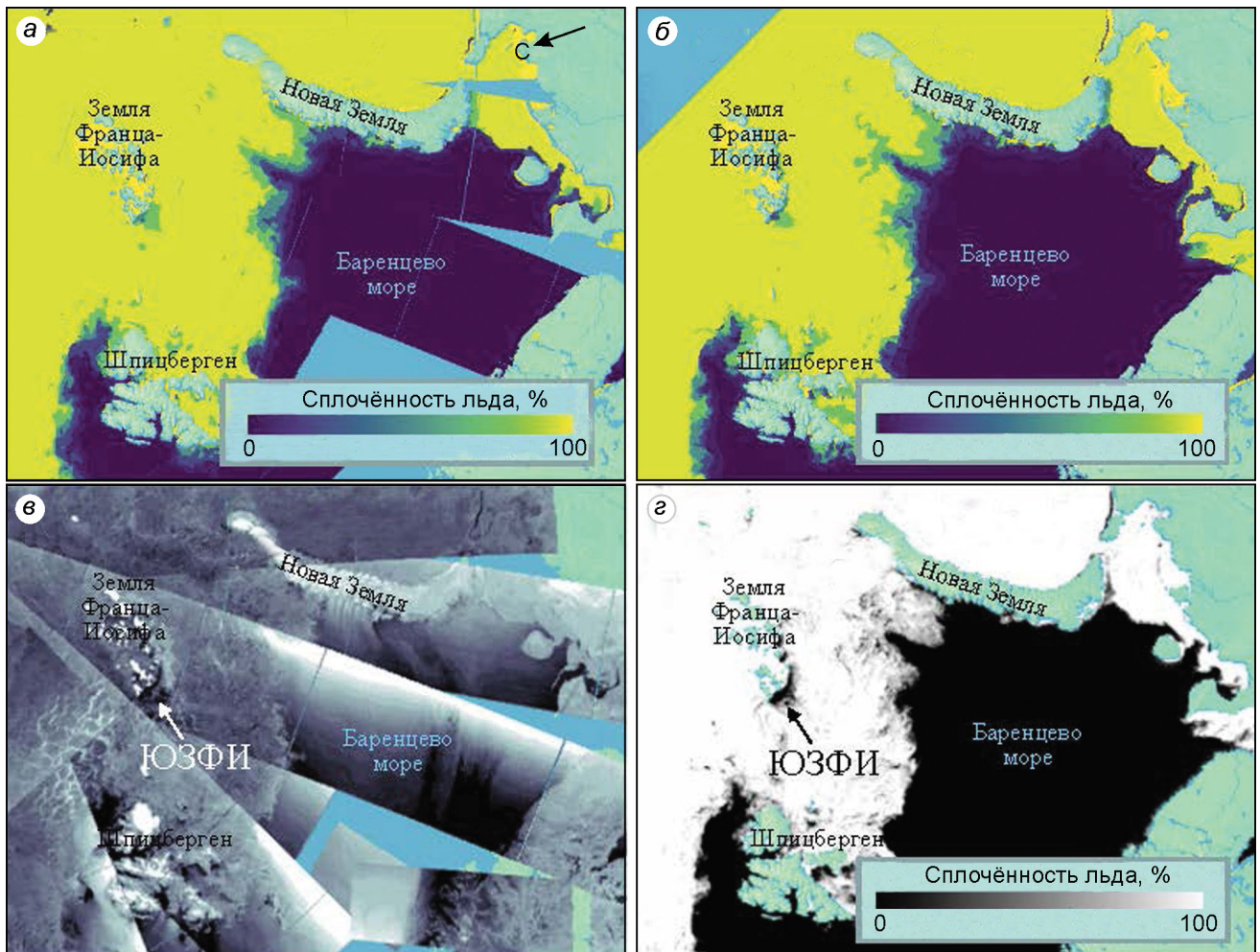
A layer of the sea ice concentration with a transparency of 35% is given in a seismic color scheme and superimposed on the visible MODIS image. Available Sentinel-1B SAR images are superimposed at the top

воды на основе снимков PCA Sentinel-1 в портал для оперативного мониторинга требует продолжения исследований.

## Заключение

Современная политика крупнейших зарубежных центров спутниковых данных позволяет бесплатно использовать их для изучения морских льдов. Однако огромные объёмы и разнообразие типов и форматов доступных данных затрудняют их эффективное использование без представления в среде геосервисов. Созданный для мониторинга и прогноза состояния окружающей среды Арктики Арктический портал Лаборатории спутниковой океанографии Российского государственного гидрометеорологического университета позволяет оперативно





**Рис. 5.** Классификация льда по данным Sentinel-1 23 апреля 2018 г.: *a* – с использованием алгоритма, разработанного в Лаборатории спутниковой океанографии; *б* – готовый продукт Норвежского метеорологического института; *в* – поле удельной эффективной площади рассеяния радиолокационного сигнала по данным Sentinel-1A; *г* – поле сплочённости льда по данным AMSR-2 (продукт Университета Бремена). ЮЗФИ – полынья Южная Земля Франца-Иосифа

**Fig. 5.** Sea ice classification from Sentinel-1 SAR on April 23, 2018: *a* – using the algorithm developed in SOLab; *б* – NMI sea ice product; *в* – Sentinel-1 SAR image; *г* – daily sea ice concentration, retrieved from AMSR-2 (satellite product of the University of Bremen). ЮЗФИ – South Frantz Josef Land polynya

анализировать состояние ледяного покрова и решать задачи, связанные с изучением морского льда на основе архивных данных. Эти возможности обеспечиваются отображением на карте Арктики спутниковых продуктов разного пространственного разрешения и временного осреднения и набором интерактивных инструментов для анализа. Каждый из продуктов, пригодных для мониторинга морского льда, имеет свои достоинства и ограничения. Их совместное использование позволяет определять положение кромки льда и его сплочённость, изучать суточную изменчивость ледяного покрова, про-

цессы формирования различных типов и форм морского льда, проводить анализ полыней и разрывов в ледяном покрове, верифицировать существующие и новые продукты по морскому льду и карты морского льда.

**Благодарности.** Исследования, представленные в настоящей работе, выполнены с помощью гранта Российского научного фонда № 17-77-30019.

**Acknowledgments.** The work has been supported by the Russian Science Foundation project # 17-77-30019.

## Литература

## References

1. Фролов И.Е. Океанография и морской лед. М.: Paulsen, 2011. 432 с.
2. 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. Т. 11. № 1. P. 33–46.
3. Rivas B.M., Ootosaka I., Stoffelen A., Verhoef A. A scatterometer record of sea ice extents and backscatter: 1992–2016 // *The Cryosphere*. 2018. V. 12. № 9. P. 2941–2953.
4. Rivas M.B., Verspeek J., Verhoef A., Stoffelen A. Bayesian Sea Ice Detection With the Advanced Scatterometer ASCAT // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2012. V. 50. № 7. P. 2649–2657.
5. Dierking W. Sea ice classification on different spatial scales for operational and scientific use // *ESA SP-722*. Edinburgh, UK. 2013. doi: 10013/epic.44280.
6. Muckenhuber S., Sandven S. Open-source sea ice drift algorithm for Sentinel-1 SAR imagery using a combination of feature tracking and pattern matching // *The Cryosphere*. 2017. V. 11. № 4. P. 1835–1842.
7. Ressel R., Frost A., Lehner S. A Neural Network-Based Classification for Sea Ice Types on X-Band SAR Images // *IEEE Journ. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2015. V. 8. № 7. P. 3672–3680.
8. Leigh S., Wang Z., Clausi D.A. Automated Ice–Water Classification Using Dual Polarization SAR Satellite Imagery // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2014. V. 52. № 9. P. 5529–5539.
9. Смирнов В.Г., Бушуев А.В., Захваткина Н.Ю., Лощилов В.С. Спутниковый мониторинг морских льдов // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2010. Т. 85. № 2. С. 62–76.
10. Key J., Haefliger M. Arctic ice surface temperature retrieval from AVHRR thermal channels // *Journ. of Geophys. Research. Atmospheres*. 1992. V. 97. № D5. P. 5885–5893.
11. Salomonson V.V., Barnes W., Xiong J., Kempler S., Masuoka E. An overview of the Earth Observing System MODIS instrument and associated data systems performance // *Proc. of IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2002. V. 2. P. 1174–1176.
12. Vermote E.F., Roger J.P., Ray J.P. MODIS surface reflectance user’s guide. MODIS Land Surface Reflectance Science Computing Facility, version 1.4, 2015. P. 35.
13. Feng L., Hu C., Li J. Can MODIS Land Reflectance Products be Used for Estuarine and Inland Waters? // *Water Resource Research*. 2018. V. 54. № 5. P. 3583–3601.
14. Comiso J.C., Cavalieri D.J., Parkinson C.L., Gloersen P. Passive microwave algorithms for sea ice concentration: A comparison of two techniques // *Remote Sensing of Environment*. 1997. V. 60. № 3. P. 357–384.
1. Frolov I.E. *Okeanografiya i morskoy led*. Oceanography and sea ice. Moscow: Paulsen, 2011: 432 p. [In Russian].
2. 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, 11 (1): 33–46.
3. Rivas B.M., Ootosaka I., Stoffelen A., Verhoef A. A scatterometer record of sea ice extents and backscatter: 1992–2016. *The Cryosphere*. 2018, 12 (9): 2941–2953.
4. Rivas M.B., Verspeek J., Verhoef A., Stoffelen A. Bayesian Sea Ice Detection With the Advanced Scatterometer ASCAT. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2012, 50 (7): 2649–2657.
5. Dierking W. Sea ice classification on different spatial scales for operational and scientific use. *ESA SP-722*. Edinburgh, UK. 2013, doi: 10013/epic.44280.
6. Muckenhuber S., Sandven S. Open-source sea ice drift algorithm for Sentinel-1 SAR imagery using a combination of feature tracking and pattern matching. *The Cryosphere*. 2017, 11 (4): 1835–1842.
7. Ressel R., Frost A., Lehner S. A Neural Network-Based Classification for Sea Ice Types on X-Band SAR Images. *IEEE Journ. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2015, 8 (7): 3672–3680.
8. Leigh S., Wang Z., Clausi D.A. Automated Ice–Water Classification Using Dual Polarization SAR Satellite Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2014, 52 (9): 5529–5539.
9. Smirnov V.G., Bushuev A.V., Zakhvatkina N.Yu., Loshchilov V.S. Satellite monitoring of sea ice. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2010, 85 (2): 62–76. [In Russian].
10. Key J., Haefliger M. Arctic ice surface temperature retrieval from AVHRR thermal channels. *Journ. of Geophys. Research. Atmospheres*. 1992, 97 (D5): 5885–5893.
11. Salomonson V.V., Barnes W., Xiong J., Kempler S., Masuoka E. An overview of the Earth Observing System MODIS instrument and associated data systems performance. *Proc. of the IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2002, 2: 1174–1176.
12. Vermote E.F., Roger J.P., Ray J.P. MODIS surface reflectance user’s guide. MODIS Land Surface Reflectance Science Computing Facility, version 1.4. 2015: 35.
13. Feng L., Hu C., Li J. Can MODIS Land Reflectance Products be Used for Estuarine and Inland Waters? *Water Resource Research*. 2018, 54 (5): 3583–3601.
14. Comiso J.C., Cavalieri D.J., Parkinson C.L., Gloersen P. Passive microwave algorithms for sea ice concentration: A comparison of two techniques. *Remote Sensing of Environment*. 1997, 60 (3): 357–384.

15. *Teleti P.R., Luis A.J.* Sea Ice Observations in Polar Regions: Evolution of Technologies in Remote Sensing // Intern. Journ. of Geosciences. 2013. V. 4. № 7. P. 1031–1050.
16. *Ivanova N., Pedersen L.T., Tonboe R.T., Kern S., Heygster G., Lavergne T., Sørensen A., Saldo R., Dybkjaer G., Brucker L., Shokr M.* Satellite passive microwave measurements of sea ice concentration: An optimal algorithm and challenges // The Cryosphere. 2015. V. 9. P. 1797–1817.
17. *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. Journ. of Remote Sensing. 1987. V. 8. № 10. P. 1479–1487.
18. *Spreen G., Kaleschke L., Heygster G.* Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels // Journ. of Geophys. Research. Oceans 1978–2012. 2008. V. 113. № C2. doi: 10.1029/2005JC003384.
19. *Асмус В.В., Затыгалова В.В., Кровотынцев В.А., Тренина И.С.* Картографический веб-сервис мультимасштабной спутниковой информационной продукции ледовой обстановки северной части Каспийского моря в период 2012–2014 гг. // Геоматика. 2016. Т. 1. С. 88–91.
20. *Карелин И.Д., Карклин В.П.* Припай и заприпайные полыньи арктических морей сибирского шельфа в конце XX – начале XXI века. СПб.: ААНИИ, 2012. 180 с.
15. *Teleti P.R., Luis A.J.* Sea Ice Observations in Polar Regions: Evolution of Technologies in Remote Sensing. Intern. Journ. of Geosciences. 2013, 4 (7): 1031–1050.
16. *Ivanova N., Pedersen L.T., Tonboe R.T., Kern S., Heygster G., Lavergne T., Sørensen A., Saldo R., Dybkjaer G., Brucker L., Shokr M.* Satellite passive microwave measurements of sea ice concentration: An optimal algorithm and challenges. The Cryosphere. 2015, 9: 1797–1817.
17. *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. Journ. of Remote Sensing. 1987, 8 (10): 1479–1487.
18. *Spreen G., Kaleschke L., Heygster G.* Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels. Journ. of Geophys. Research. Oceans 1978–2012. 2008, 113 (C2): doi: 10.1029/2005JC003384.
19. *Asmus V.V., Zatiagalova V.V., Krovotyntsev V.A., Trenina I.S.* Web mapping service for multiscale satellite information products of ice conditions in the northern part of the Caspian Sea in the period 2012–2014. *Geomatika*. Geomatics. 2016, 1: 88–91. [In Russian].
20. *Karelin V.P., Karklin V.P.* *Pripay i zapripaynye polyn'i arkticheskikh morey sibirskogo shel'fa v kontse XX – nachale XXI veka.* Fast ice and polynyias of the Arctic seas of the Siberian shelf in the end of XX – beginning of XXI century. St. Petersburg: AARI, 2012: 180 p. [In Russian].