

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЛОЩАДИ МОРСКОГО ЛЬДА В АРКТИКЕ, ПОЛУЧЕННОЙ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ МИКРОВОЛНОВОЙ РАДИОМЕТРИИ (АЛГОРИТМ VASIA2), С ЛЕДОВЫМИ КАРТАМИ ААНИИ

© 2020 г. Т. А. Алексеева^{а, *}, М. Д. Раев^б, В. В. Тихонов^б, Ю. В. Соколова^а,
Е. А. Шарков^б, С. В. Фролов^а, С. С. Сероветников^а

^аФГБУ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

^бИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

*E-mail: taa@aari.ru

Поступила в редакцию 21.07.2020 г.

В данном кратком сообщении представлено сравнение площади морского льда в Арктике, рассчитанной с помощью алгоритма VASIA2 по данным SSMIS в период максимального таяния ледяного покрова в 2019 г., с ледовыми картами ААНИИ. Результаты расчетов общей площади поверхности океана, покрытой морским льдом любой сплоченности от 0.1 до 10 баллов, выявили разницу в –1.1% с ледовой картой от 25–27 августа и +3.4% с ледовой картой от 1–3 сентября. При анализе распределения площади льда по градациям сплоченности было показано, что алгоритм VASIA2 с высокой точностью определяет количество очень сплоченных и сплошных льдов в пределах ледяного массива, переоценивает площадь редких и разреженных льдов и недооценивает площадь сплоченных льдов. Полученные результаты показали перспективность применения алгоритма VASIA2 в различных научных задачах, связанных с изменением площади и сплоченности ледяного покрова, и необходимость более углубленного и масштабного сравнения результатов алгоритма с ледовыми картами.

Ключевые слова: спутниковая микроволновая радиометрия, морской лед, Арктика, алгоритм VASIA2, ледовые карты, сплоченность льда, площадь ледяного покрова

DOI: 10.31857/S0205961420060020

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в Арктике отмечается существенное уменьшение площади и толщины морского льда (Box et al., 2019; Lindsay and Schweiger, 2015). Изменения морского льда фиксируются различными методами: дистанционным зондированием Земли (ДЗЗ), инструментальными измерениями непосредственно на морском льду, с борта судов, самолетов и вертолетов, подводных лодок, а также беспилотных летательных аппаратов (Eicken et al., 2009). Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. Натурные измерения позволяют получить более точные данные обо всех параметрах ледяного покрова, но на ограниченном участке работ, и только регулярные ежегодные экспедиции по одному маршруту дают возможность определить межгодовую изменчивость морского льда в данном регионе. Спутниковые данные хотя и дают информацию не о всех параметрах ледяного покрова, но являются регулярными и охватывают существенно большие площади.

Среди спутниковых данных при изучении изменчивости ледяного покрова особое место уде-

ляется данным микроволновой радиометрии. Во-первых, из-за наиболее длинного ряда данных — измерения, начатые в 1978 г. с помощью радиометра SSMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer) и продолженные с помощью радиометров SSM/I (Special Sensor Microwave Imager) и SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder) являются самым продолжительным непрерывным рядом данных (Тихонов и др., 2016). Во-вторых, данные спутниковой микроволновой радиометрии ежедневные, всепогодные и охватывают всю акваторию Северного Ледовитого океана (СЛО). Для расчета общей сплоченности морского льда по значениям яркостной температуры поверхности, которую определяют микроволновые радиометры, уже создано и используется большое число алгоритмов, которые постоянно совершенствуются. Обзоры существующих алгоритмов представлены в ряде работ (см., например, Тихонов и др., 2016; Ivanova et al., 2014; Meier, 2005; Shokr and Sinha, 2015). У каждого алгоритма есть свои преимущества и недостатки. При определении общей площади ледяного покрова разница в значениях, полученная по разным алгоритмам, может достигать 1.3 млн км² (Ivanova et al., 2014),

тогда как графики изменения площади ледяного покрова показывают ее изменение от 0.534 до 0.978 млн км² за десятилетний период, в зависимости от алгоритма. То есть, ошибки данных спутниковой микроволновой радиометрии, по которым определяется площадь ледяного покрова, сопоставимы с межгодовыми изменениями площади льда в Арктике. Основными причинами ошибок являются: сезонная изменчивость излучательной способности морского льда и снежного покрова, внесезонная региональная изменчивость излучательной способности снежно-ледяной поверхности, изменение точек привязки при разных градациях сплоченности, влияние погодных эффектов (Wiebe et al., 2009; Заболотских, 2019; Тихонов и др., 2016). В зарубежной и российской литературе опубликован ряд работ, посвященных сравнению результатов, полученных по различным алгоритмам с другими источниками данных, что имеет большое значение для последующего усовершенствования этих алгоритмов и получения более точной и надежной информации (Andersen et al., 2007; Kern et al., 2019).

Сотрудниками трех научных институтов: Института космических исследований РАН, Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН и Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) разработан первый российский алгоритм определения сплоченности и площади морского льда полярных регионов по данным спутниковой микроволновой радиометрии — Variation Arctic/Antarctic Sea Ice Algorithm (VASIA2) (Тихонов и др., 2015; Tikhonov et al., 2015). Структура построения этого алгоритма принципиально отличается от всех современных алгоритмов. В основе него лежат не экспериментальные данные и точки привязки, а теоретическая модель излучения системы “морская поверхность—ледяной покров—снежный покров—атмосфера” (Tikhonov et al., 2014). В работах (Алексеева и др., 2018 и Alekseeva et al., 2019) представлен анализ ошибок алгоритма VASIA2 в различных ледовых условиях, проведенный на основе сравнения алгоритма с данными судовых наблюдений, кроме этого выполнен анализ результатов сравнения относительно двух из наиболее популярных алгоритмов NASA Team (NT) и ARTIST Sea Ice (ASI). Было показано, что алгоритмы NT, ASI и VASIA2 в летний период переоценивают общую сплоченность ледяного покрова в редких льдах и недооценивают в сплоченных льдах. Максимальные ошибки в определении сплоченности у всех алгоритмов наблюдаются в разреженных льдах. Из трех алгоритмов VASIA2 показывает минимальные ошибки в сплошных льдах в летний период.

В продолжение работы по валидации алгоритма VASIA2, в данном кратком сообщении приводятся первые результаты сопоставления площади

морского льда СЛО с еще одним источником информации о ледяном покрове — ледовыми картами ААНИИ. Были рассмотрены летние данные на конец августа—начало сентября 2019 г., то есть в период максимального разрушения ледяного покрова в Арктике. В разделе “Данные и методы” описаны нюансы построения ледовых карт ААНИИ, исходя из которых сопоставление возможно для общей площади поверхности моря, покрытой льдами любой сплоченности, а также отдельно для площади моря, покрытой льдами четырех основных градаций сплоченности. Раздел “Спутниковые данные” посвящен краткой информации об используемых спутниковых данных. В разделе “Результаты и их обсуждение” приводятся и обсуждаются полученные результаты.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Ледовые карты. Принцип построения ледовых карт ААНИИ подробно изложен в публикации (Афанасьева et al., 2019). Общая ледовая карта СЛО, еженедельно выпускаемая на сайте ААНИИ (www.aari.ru), составляется путем “склейки” обзорных карт всех морей, каждое из которых рисуется одним ледовым экспертом. При создании обзорной ледовой карты эксперты используют различные виды спутниковых данных, собранных за 2–3 сут (где более свежая информация является приоритетной), поскольку получить ледовую карту для всей площади СЛО в один день невозможно из-за наличия облачности на оптических и ИК-снимках и неполного покрытия акватории радарными данными. В летний период (1 июня—30 сентября для СЛО) на ледовых картах указывается только сплоченность ледяного покрова по 10-балльной шкале. Ледовые зоны могут характеризоваться как отдельными баллами сплоченности, например, 4 балла или 10 баллов, так и различными интервалами сплоченности, например, 1–3 балла.

Спутниковые данные. В качестве источника спутниковой информации для расчета сплоченности льда по алгоритму VASIA2 были использованы данные многочастотного комплекса SSMIS программы DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) (Sun, Weng, 2008). Для этого была задействована база SSM/I и SSMIS изображений полярных районов POLE-RT-Fields, созданная на основе, разработанной в отделе “Исследование Земли из космоса” ИКИ РАН базы данных GLOBAL-RT (Ермаков и др., 2007).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для сопоставления площади ледяного покрова были выбраны две общие ледовые карты СЛО за периоды 25–27 августа и 1–3 сентября 2019 г., составленные на основе спутниковых данных

Таблица 1. Площадь льдов различной градации сплоченности по ледовым картам ААНИИ и данным алгоритма VASIA2

Градации сплоченности (баллы)	Карта ААНИИ от 25–27 августа 2019 г., млн км ²	VASIA2 – среднее по снимкам от 25–27 августа 2019 г.	Разница (VASIA2 – карта ААНИИ), млн км ²	Разница в % от площади на карте ААНИИ
(1–3)	0.460	0.460	0.000	0.0
(4–6)	0.429	0.735	0.306	71.4
(7–8)	0.813	0.415	–0.398	–49.0
(9–10, 10)	3.277	3.315	0.038	1.2
Итого:	4.979	4.925	–0.054	–1.1
Градации сплоченности (баллы)	Карта ААНИИ от 1–3 сентября 2019 г., млн км ²	VASIA2 среднее значение по снимкам от 1–3 сентября 2019 г.	Разница (VASIA2 – карта ААНИИ), млн км ²	Разница в % от площади на карте ААНИИ
(1–3)	0.364	0.480	0.116	31.8
(4–6)	0.377	0.600	0.223	59.0
(7–8)	0.659	0.400	–0.259	–39.3
(9–10, 10)	3.321	3.400	0.079	2.4
Итого:	4.722	4.880	0.158	3.4

MODIS, AVHRR, VIIRS и Sentinel-1A,B. Так как каждая карта составлена ледовыми экспертами по спутниковой информации за указанные трое суток, то по данным алгоритма VASIA2 рассчитывалась площадь льда, осредненная за трое суток 25–27 августа и трое суток 1–3 сентября, соответственно. Данные спутниковой микроволновой радиометрии позволяют определять сплоченность с шагом 0.1 балла, тогда как сплоченность на ледовых картах определяется либо с шагом в 1 балл, либо в пределах интервалов сплоченности. Вследствие этого сопоставление площади в данной работе проводилось по информации с большим шагом, то есть в пределах следующих градаций сплоченности льда: 1–3 (редкие льды), 4–6 (разреженные льды), 7–8 (сплощенные льды) и 9–10; 10 (очень сплоченные и сплошные льды) баллов. К сожалению, по методике составления ледовых карт в летний период практически все области очень сплоченных льдов отмечаются сплоченностью 9–10 баллов, а зоны сплошных 10-балльных льдов в летний период отдельно не определяются. Это связано с тем, что для составления обзорных ледовых карт используются преимущественно снимки низкого и среднего разрешения открытого доступа (MODIS – 250 м, Suomi NPP – 375 м, NOAA – 1000 м, а также Sentinel-1 – от 10 м). Так как в период таяния в ледяных массах в первую очередь вытаивают более тонкие льды, распадаются сморози ледяных полей, и если в исследуемом районе в данный момент отсутствуют сжатия, то в летний период в дрейфующем морском льду преимущественно имеются разрывы и разводья, но их невозможно определить по

снимкам низкого разрешения. Следовательно, обзорные ледовые карты в летний период не позволяют отделить площадь льдов сплоченностью 9–10 от 10 баллов, где алгоритм VASIA2 показывает хорошие результаты при сравнении с данными судовых наблюдений (Alekseeva et al., 2019). Поэтому в данной работе градации очень сплоченных и сплошных льдов объединены в одну.

Результаты сравнения приведены в табл. 1. На ледовой карте ААНИИ от 25–27 августа площадь моря, покрытая льдом любой сплоченности от 0.1 до 10 баллов, составила 4.979 млн км², а на карте от 1–3 сентября – 4.722 млн км². Соответствующая этим датам площадь льда по данным алгоритма VASIA2 составила 4.925 (на 1.1% меньше, чем на карте ААНИИ) и 4.880 млн км² (на 3.4% больше, чем на карте ААНИИ). При этом стоит отметить небольшую разницу в площади очень сплоченных и сплошных льдов, которые занимают 66% от общей площади моря, покрытой льдом, на первой карте ААНИИ и 70% – на второй. Разница площади очень сплоченных и сплошных льдов составила лишь 1.2% 25–27 августа и 2.4% 1–3 сентября (см. табл. 1).

На рис. 1 для примера представлена общая ледовая карта СЛО от 25–27 августа 2019 г. и соответствующее ей изображение сплоченности ледяного покрова по данным алгоритма VASIA2 от 27 августа 2019 г. Ледовые условия в этот период были следующими: центральная часть Арктического бассейна и канадская часть Арктики покрыты единым массивом очень сплоченных льдов, в прикромочных областях выделяются зо-

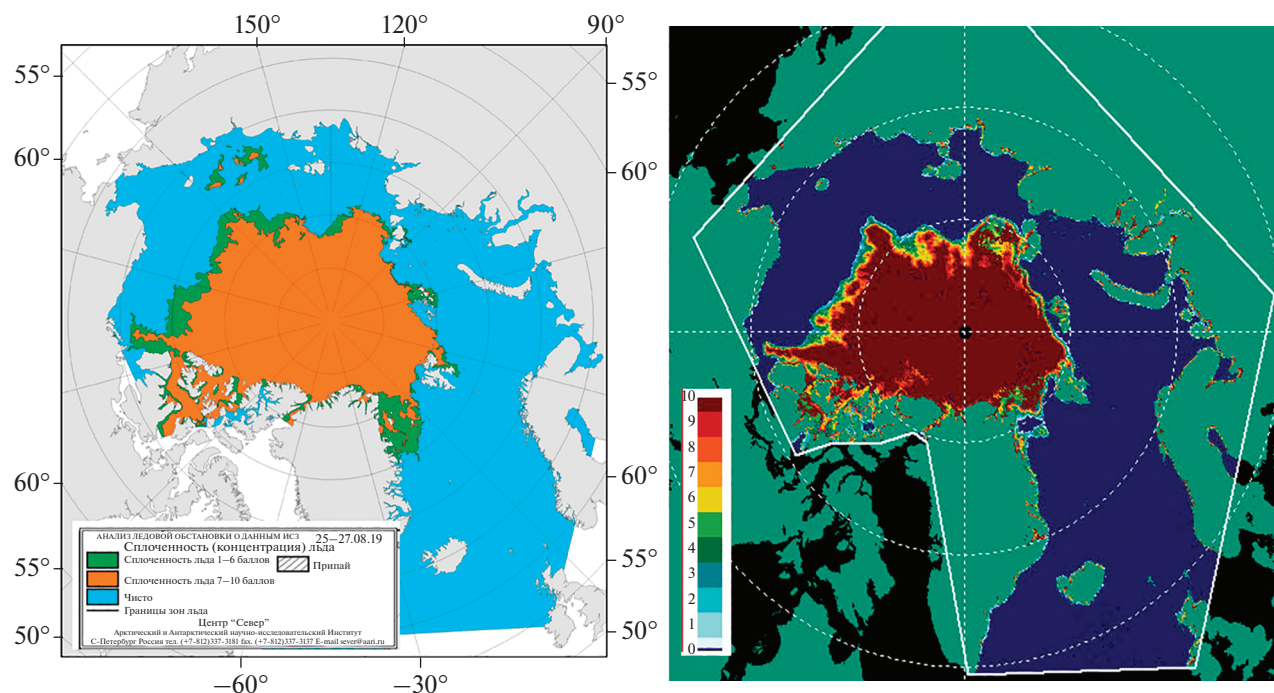


Рис. 1. Общая ледовая карта ААНИИ (слева) и изображение сплоченности морского льда по алгоритму VASIA2 на акватории СЛО (справа). Цветовые шкалы указывают градацию сплоченности в баллах.

ны разреженных и редких льдов. Очень сплоченными и сплошными льдами покрыта часть проливов в Канадском Арктическом архипелаге. Отдельные зоны дрейфующих льдов сохранились в Восточно-Сибирском море. По карте и спутниковому изображению видно хорошее совпадение площадей очень сплоченных льдов в массиве льдов Арктического бассейна, относительно хорошее соответствие в прикромочных зонах ледяного массива и в проливах Канадского Арктического архипелага. Однако абсолютно отсутствуют на

спутниковом изображении дрейфующие льды в Восточно-Сибирском море. В данном районе в конце августа 2019 г. сохранились остатки дрейфующих льдов, сформировавшихся ранее в прибрежных районах, с включениями терригенного происхождения из-за которых происходит более интенсивное таяние льда. Таким образом, на последней стадии разрушенности большая часть более тонкого ровного льда вытаяла, а сохранились битые (в среднем от 1 до 100 м в диаметре) сильно разрушенные и притопленные в воде льдины со сквозными снежницами, а также отдельные подтаявшие гряды торосов. Такие льды представляют сложность для идентификации методами пассивного микроволнового зондирования.

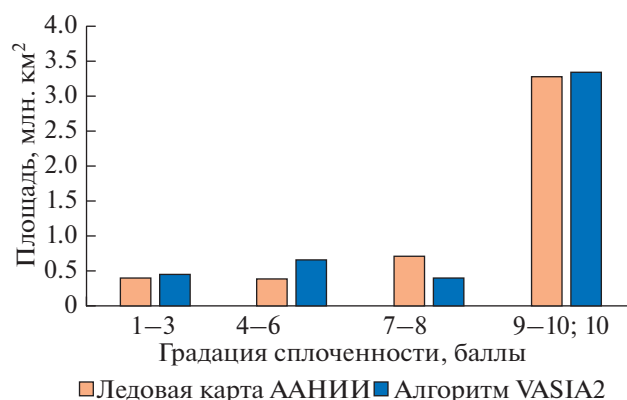


Рис. 2. Распределение площади ледяного покрова по различным градациям сплоченности на карте ААНИИ и спутниковом изображении по алгоритму VASIA2.

Осредненные за два рассматриваемых периода (25–27 августа и 1–3 сентября 2019 г.) данные по площади льдов изображены на рис. 2. В целом, видно, что алгоритмом VASIA2 переоценивается площадь редких и разреженных льдов, недооценивается площадь сплоченных льдов и хорошо определяется площадь очень сплоченных и сплошных льдов.

Однако стоит отметить, что если рассматривать площади областей, занимаемых льдами сплоченностью 4–8 баллов, то алгоритм VASIA2 покажет очень хорошее совпадение с картами ААНИИ. Разница общей площади составила: –7.4% в августе и –3.5% в сентябре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном сообщении представлены предварительные результаты сравнения площади ледяного покрова СЛО, полученной по алгоритму VASIA2 с ледовыми картами ААНИИ в период максимального разрушения ледяного покрова. Общая площадь океана, покрытая льдами любой сплоченности от 0.1 до 10 баллов, рассчитанная по этим двум источникам информации, практически полностью совпадает. Разница общей площади составила -1.1% по карте от 25–27 августа и $+3.4\%$ по карте от 1–3 сентября. Алгоритм VASIA2 переоценивает площадь редких и разреженных льдов и недооценивает площадь сплоченных льдов, а площадь очень сплоченных и сплошных льдов практически совпадает с площадью таких льдов на картах ААНИИ.

Представленные результаты, наряду с результатами сравнения алгоритма VASIA2 с данными судовых наблюдений (Alekseeva et al., 2019), позволяют высоко оценить точность определения сплоченности морского льда с помощью данного алгоритма для выполнения ряда научных задач, таких, например, как определение межгодовой и сезонной изменчивости площади морского льда. В настоящее время ведутся работы по дальнейшему сравнению алгоритма не только с общими ледовыми картами СЛО, но и с более детализированными региональными картами шельфовых морей в летний и зимний периоды. Таким образом, подробное исследование по сравнению алгоритма VASIA2 с судовыми данными и картами ААНИИ позволит выявить все положительные и отрицательные свойства алгоритма для его последующего усовершенствования.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа с ледовыми картами, составленными в Центре ледовой и гидрометеорологической информации ААНИИ, выполнялась в рамках гранта РФФИ № 18-05-60048 “Исследование межгодовой изменчивости баланса морского льда Северного Ледовитого океана на рубеже XX и XXI веков” (Т.А. Алексеева, С.В. Фролов, С.С. Сероветников). Работа со спутниковыми данными и их интерпретацией по алгоритму VASIA2 выполнялась в рамках темы “Мониторинг” гос. регистрация № 01.20.0.2.00164 (М.Д. Раев, В.В. Тихонов, Е.А. Шарков).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеева Т.А., Тихонов В.В., Фролов С.В., Раев М.Д., Репина И.А., Соколова Ю.В., Афанасьева Е.В., Шарков Е.А., Сероветников С.С. Сравнение сплоченности ледяного покрова по данным спутниковой микроволновой радиометрии с данными визуальных судовых наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 6. С. 65–76. <https://doi.org/10.31857/S020596140003369-6>

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. <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2019-10071>

Ермаков Д.М., Раев М.Д., Суслев А.И., Шарков Е.А. Электронная база многолетних данных глобального радиотеплового поля Земли в контексте многомасштабного исследования системы океан–атмосфера // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 1. С. 7–13.

Заболотских Е.В. Обзор методов восстановления параметров ледяного покрова по данным спутниковых микроволновых радиометров // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 128–151. <https://doi.org/10.31857/S0002-3515551128-151>

Тихонов В.В., Раев М.Д., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Репина И.А., Комарова Н.Ю. Спутниковая микроволновая радиометрия морского льда полярных регионов. Обзор // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 4. С. 65–84. <https://doi.org/10.7868/S0205961416040072>

Тихонов В.В., Репина И.А., Раев М.Д., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Комарова Н.Ю. Комплексный алгоритм определения ледовых условий в полярных регионах по данным спутниковой микроволновой радиометрии (VASIA2) // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 2. С. 78–93. <https://doi.org/10.7868/S0205961415020104>

Alekseeva T.A., Tikhonov V.V., Frolov S.V., Repina I.A., Raev M.D., Sokolova J.V., Sharkov E.A., Afanasieva E.A., Serovetnikov S.S. Comparison of Arctic Sea Ice Concentrations from the NASA Team, ASI, and VASIA2 Algorithms with Summer and Winter Ship Data // Remote Sens. 2019. V. 11. № 21. P. 2481. <https://doi.org/10.3390/rs11212481>

Andersen S., Tonboe R., Kaleschke L., Heygster G., Pedersen L.T. Intercomparison of passive microwave sea ice concentration retrievals over the high-concentration Arctic sea ice // J. Geophys. Res. Oceans. 2007. V. 112. № C08004. <https://doi.org/10.1029/2006JC003543>

Box J.E., Colgan W.T., Christensen T.R., Schmidt N.M., Lund M., Parmentier F.-J.W., Brown R., Bhatt U.S., Euskirchen E.S., Romanovsky V.E., Walsh J.E., Overland J.E., Wang M., Corell R.W., Meier W.N., Wouters B., Mernild S., Mård J., Pawlak J., Olsen M. S. Key indicators of Arctic climate change: 1971–2017 // Environ. Res. Lett. 2019. V. 14. № 4. P. 045010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafc1b>

Eicken H., Gradinger R., Salganek M., Shirasawa K., Perovich D., Lepparanta M. Field Techniques for Sea Ice Research. University of Alaska Press, 2009. 566 p.

Ivanova N., Johannessen O.M., Pedersen L.T., Tonboe R.T. Retrieval of Arctic Sea Ice Parameters by Satellite Passive Microwave Sensors: A Comparison of Eleven Sea Ice Concentration Algorithms // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2014. V. 52. № 11. P. 7233–7246. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2310136>

Kern S., Laverne T., Notz D., Pedersen L.T., Tonboe R.T., Saldo R., Sørensen A.M. Satellite passive microwave sea-ice concentration data set intercomparison: closed ice and ship-based observations // The Cryosphere. 2019. V. 13. № 12. P. 3261–3307. <https://doi.org/10.5194/tc-13-3261-2019>

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.
<https://doi.org/10.5194/tc-9-269-2015>

Meier W. Comparison of passive microwave ice concentration algorithm retrievals with AVHRR imagery, in Arctic peripheral seas // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2005. V. 43. № 6. P. 1324–1337.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.846151>

Shokr M., Sinha N. Sea ice: physics and remote sensing. John Wiley & Sons, American Geophysical Union. USA, 2015. 600 p.

Sun N., Weng F. Evaluation of Special Sensor Microwave Imager/Sounder (SSMIS) Environmental Data Records // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2008. V. 46. № 4. P. 1006–1016.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.917368>

Tikhonov V.V., Boyarskii D.A., Sharkov E.A., Raev M.D., Repina I.A., Ivanov V.V., Alexeeva T.A., Komarova N.Y. Microwave Model of Radiation from the Multilayer “Ocean–Atmosphere” System for Remote Sensing Studies of the Polar Regions // *Prog. Electrom. Res. B*. 2014. V. 59. P. 123–133.
<https://doi.org/10.2528/PIERB14021706>

Tikhonov V.V., Repina I.A., Raev M.D., Sharkov E.A., Ivanov V.V., Boyarskii D.A., Alexeeva T.A., Komarova N.Yu. A physical algorithm to measure sea ice concentration from passive microwave remote sensing data // *Adv. Space Res.* 2015. V. 56. № 8. P. 1578–1589.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.07.009>

Wiebe H., Heygster G., Markus T. Comparison of the ASI Ice Concentration Algorithm With Landsat-7 ETM+ and SAR Imagery // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2009. V. 47. № 9. P. 3008–3015.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2026367>

Comparative Analysis of Sea Ice Area in the Arctic, derived from Satellite Microwave Radiometry (Algorithm VASIA2), with AARI Ice Charts

T. A. Alekseeva¹, M. D. Raev², V. V. Tikhonov², J. V. Sokolova¹, E. A. Sharkov²,
S. V. Frolov¹, and S. S. Serovetnikov¹

¹Federal State Budgetary Institution Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

²Space Research Institute Russian Academy of Science, Moscow, Russia

In present work area of Arctic sea ice, calculated by algorithm VASIA2 using SSMIS data during the period of the most intensive melting in 2019, is compared with AARI ice charts. Total area of ice of any concentration from 0.1 to 10 tenths was calculated and results show difference of –1.1% with the ice chart dated 25–27 August and +3.4% with ice chart dated 1–3 September. Analysis of ice area distribution by various ranges of ice concentrations presents that algorithm VASIA2 defines with high accuracy area of very close and compact ice in the Arctic Basin, overestimates area of very open and open ice and underestimates area of close ice. Obtained results showed potential of application of algorithm VASIA2 in scientific tasks concerned with changes of ice area and ice concentration, as well as necessity of more in-depth comparison of the algorithm with ice charts.

Keywords: satellite microwave radiometry, sea ice, Arctic, algorithm VASIA2, ice chart, ice concentration, area of ice cover

REFERENCES

Afanasieva E.V., Alekseeva T.A., Sokolova J.V., Demchev D.M., Chufarova M.S., Bychenkov Yu. D., Devyataev O. S. Metodika sostavleniya ledovykh kart AANII [Methodology for compiling ice maps of the AARI] // *Russian Arctic*. 2019. № 7. P. 5–20. DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10071

Alekseeva T.A., Tikhonov V.V., Frolov S.V., Repina I.A., Raev M.D., Sokolova J.V., Sharkov E.A., Afanasieva E.A., Serovetnikov S.S. Comparison of Arctic Sea Ice Concentrations from the NASA Team, ASI, and VASIA2 Algorithms with Summer and Winter Ship Data // *Remote Sens.* 2019. № 11. 2481.
<https://doi.org/10.3390/rs11212481>

Alekseeva T.A., Tikhonov V.V., Frolov S.V., Raev M.D., Repina I.A., Sokolova J.V., Afanasieva E.V., Sharkov E.A., Serovetnikov S.S. Comparing the Satellite Microwave and Visual Shipborne Sea Ice Concentration. // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. V. 55. № 9. P. 1292–1301. DOI: 10.1134/S0001433819090032

Andersen S., Tonboe R., Kaleschke L., Heygster G., Pedersen L.T. Intercomparison of passive microwave sea ice concentration retrievals over the high-concentration Arctic sea ice //

J. Geophys. Res. Oceans. 2007. V. 112. C08004. DOI: 10.1029/2006JC003543

Box J.E., Colgan W.T., Christensen T.R., Schmidt N.M., Lund M., Parmentier F.-J.W., Brown R., Bhatt U.S., Euskirchen E.S., Romanovsky V.E., Walsh J.E., Overland J.E., Wang M., Corell R.W., Meier W.N., Wouters B., Mernild S., Mård J., Pawlak J., Olsen M. S. Key indicators of Arctic climate change: 1971–2017 // *Environ. Res. Lett.* 2019. V. 14. № 4. P. 045010.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafc1b>

Eicken H., Gradinger R., Salganek M., Shirasawa K., Perovich D., Lepparanta M. Field Techniques for Sea Ice Research. University of Alaska Press. 2009. 566 p.

Ermakov D.M., Raev M.D., Suslov A.I., Sharkov E.A. Elektronnaya baza mnogoletnih dannykh global'nogo radioteplovogo polya Zemli v kontekste mnogomasshtabnogo issledovaniya sistemy okean–atmosfera [Electronic database of long-term data of the global radio-thermal field of the Earth in the context of multi-mass headquarters study of the ocean–atmosphere system] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2007. № 1. P. 7–13 (In Russian).

- Ivanova N., Johannessen O.M., Pedersen L.T., Tonboe R.T.* Retrieval of Arctic Sea Ice Parameters by Satellite Passive Microwave Sensors: A Comparison of Eleven Sea Ice Concentration Algorithms // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2014. V. 52. № 11. P. 7233–7246. DOI: 10.1109/TGRS.2014.2310136
- Kern S., Lavergne T., Notz D., Pedersen L.T., Tonboe R.T., Saldo R., Sørensen A.M.* Satellite passive microwave sea-ice concentration data set intercomparison: closed ice and ship-based observations // The Cryosphere. 2019. 13. P. 3261–3307. DOI: 10.5194/tc-13-3261-2019
- 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
- Meier W.* Comparison of passive microwave ice concentration algorithm retrievals with AVHRR imagery, in Arctic peripheral seas // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2005. V. 43. № 6. P. 1324–1337. DOI: 10.1109/TGRS.2005.846151
- Shokr M., Sinha N.* Sea ice: physics and remote sensing. John Wiley & Sons, American Geophysical Union. USA, 2015. 600 p.
- Sun N., Weng F.* Evaluation of Special Sensor Microwave Imager/Sounder (SSMIS) Environmental Data Records // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2008. V. 46. № 4. P. 1006–1016. DOI: 10.1109/TGRS.2008.917368
- Tikhonov V.V., Boyarskii D.A., Sharkov E.A., Raev M.D., Repina I.A., Ivanov V.V., Alexeeva T.A., Komarova N.Y.* Microwave Model of Radiation from the Multilayer “Ocean–Atmosphere” System for Remote Sensing Studies of the Polar Regions // Prog. Electrom. Res. B. 2014. V. 59. P. 123–133. DOI: 10.2528/PIERB14021706
- Tikhonov V.V., Repina I.A., Raev M.D., Sharkov E.A., Ivanov V.V., Boyarskii D.A., Alexeeva T.A., Komarova N.Yu.* A physical algorithm to measure sea ice concentration from passive microwave remote sensing data // Adv. Space Res. 2015. V. 56. № 8. P. 1578–1589. DOI: 10.1016/j.asr.2015.07.009
- Tikhonov V.V., Repina I.A., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarskii D.A., Komarova N.Yu.* An Integrative Algorithm for Ice Conditions Determination in Polar Regions from Satellite Microwave Radiometry (VASIA2) // Izv., Atmos. Oceanic Phys. 2015. V. 51. № 9. P. 914–928. DOI: 10.1134/S0001433815090194
- Tikhonov V.V., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarskii D.A., Repina I.A., Komarova N.Yu.* Satellite Microwave Radiometry of Sea Ice of Polar Regions: a Review // Izv., Atmos. Oceanic Phys. 2016. V. 52. № 9. P. 1012–1030. DOI: 10.1134/S0001433816090267
- Wiebe H., Heygster G., Markus T.* Comparison of the ASI Ice Concentration Algorithm With Landsat-7 ETM+ and SAR Imagery // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2009. V. 47. № 9. P. 3008–3015. DOI: 10.1109/TGRS.2009.2026367
- Zabolotskii E.V.* Obzor metodov vosstanovleniya parametrov ledyanogo pokrova po dannym sputnikovyh mikrovolnovykh radiometrov [Overview of steam recovery methods meters of ice cover according to satellite microwave radiometers] // Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana. 2019. V. 55. № 1. P. 128–151 (In Russian). DOI: 10.31857/S0002-3515551128-151