

А.С. Оганезов¹, В.М. Пищальник², В.А. Романюк³

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ЛЕДОВИТОСТИ БЕРИНГОВА МОРЯ ПО ДАННЫМ SEA ICE INDEX И MASIE

АННОТАЦИЯ

Выполнен сравнительный анализ ледовитости Берингова моря, рассчитанной по данным National Snow & Ice Data Center (NSIDC) с использованием алгоритмов NASA Team (Sea Ice Index) и совместного использования данных пассивного микроволнового и видимого диапазонов Near-Real-Time DMSP SSMIS Daily Polar Gridded Sea Ice Concentrations и Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data (MASIE-NH). Вычислены абсолютная и относительная разность значений ледовитости по алгоритмам Sea Ice Index и MASIE-NH с суточной дискретностью за 14 ледовых сезонов с 2006 по 2020 гг. Несмотря на то, что пространственные разрешения данных рассматриваемых алгоритмов и количественные критерии условия отнесения пикселя к чистой воде или ледяному покрову различны (сторона пикселя 25 и 4 км, идентификация 15 и 40 %, соответственно), кривые среднесезонного хода ледовитости синфазны, что подтверждается высоким значением коэффициента корреляции (0,92). Установлено, что разность значений ледовитости не является критичной и находится в пределах точности расчетов, что позволяет применять данные из обоих источников без расчета поправочных коэффициентов. Данные Sea Ice Index целесообразно использовать для анализа долгопериодной межсезонной изменчивости, поскольку ряд наблюдений с суточной дискретностью имеется с 1978 г. Сделан вывод о том, что использование обоих источников вполне допустимо и при анализе внутрисезонных флуктуаций. Отмечена характерная черта Sea Ice Index – фиксация наличия льда на протяжении всего теплого сезона, хотя по литературным источникам такое явление в Беринговом море характерно только для суровых типов зим. Вероятно, это связано с техническими сложностями идентификации ледяного покрова методами пассивного микроволнового зондирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ледовитость, Берингово море, данные дистанционного зондирования Земли, алгоритмы обработки SII и MASIE, сравнительный анализ

¹ ФГБОУ ВО «Сахалинский государственный университет», ул. Ленина, 290, Южно-Сахалинск, Россия, 693008, *e-mail*: artusur@mail.ru

² ФГБУН «ИМГИГ и Г ДВО РАН», ул. Науки, д. 1Б, Южно-Сахалинск, Россия, 693000, *e-mail*: vpishchalnik@rambler.ru

³ ООО «СахалинНИПИ нефти и газа», ул. Амурская, д. 53, 693000, Южно-Сахалинск, Россия, *e-mail*: varomanyuk2020@gmail.com

Artur S. Oganezov¹, Vladimir M. Pishchalnik², Valery A. Romanyuk³

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ICE COVERAGE IN THE BERING SEA ACCORDING TO THE SEA ICE INDEX AND MASIE DATA

ABSTRACT

This paper presents a comparative analysis of the ice cover of the Bering Sea. The analysis was performed according to the National Snow & Ice Data Center (NSIDC) using NASA algorithms Team (Sea Ice Index) and Near-Real-Time Passive Microwave/Visible Data Sharing DMSP SSMIS Daily Polar gridded Sea Ice Concentrations and Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data (MASIE-NH). The absolute and relative difference of the ice cover values were calculated using the algorithms Sea Ice Index and MASIE-NH with daily discreteness for 14 ice seasons from 2006 to 2020. Despite the fact that the spatial resolutions of the data of the algorithms under consideration and the quantitative criteria for the condition for classifying a pixel as pure water or ice extent differed (the side of the pixel was 25 and 4 km, identification was 15 and 40 %, respectively), the curves of the average seasonal variation of the ice cover were in phase and that was confirmed by the high value of the correlation coefficient (0.92). It was determined that the difference in ice cover values were not critical and were within the calculation limits, which allowed using data from both sources without calculating correction factors. Sea Data Ice Index data should be appropriate for long-term analysis of inter-seasonal variability, since data series of observations with daily discreteness have been available since 1978. It was concluded that the use of both sources would be quite acceptable in the analysis of intra-seasonal fluctuations. A characteristic feature of Sea Ice Index was noted – the presence of ice throughout the warm season. Although according to literary sources, such a phenomenon in the Bering Sea was typical only for severe types of winters. That was probably due to the technical difficulties in identifying the ice extent using passive microwave sounding methods.

KEYWORDS: ice cover, Bering Sea, Earth remote sensing data, SII and MASIE processing algorithms, comparative analysis

ВВЕДЕНИЕ

В качестве источников данных Sea Ice Index (SII) **использует:** Near-Real-Time DMSP SSMIS Daily Polar Gridded Sea Ice Concentrations [Meier et. al., 2021] и Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data [Cavalieri et. al., 1997]. Оба источника представляют собой **спутниковые пассивные микроволновые данные**, которые **автоматически обрабатываются с использованием оригинальных алгоритмов** [Fetterer et. al., 2017]. На картах-схемах SII ледяной покров представлен с пространственным разрешением 25 км, при анализе которого, можно рассчитать площадь льда и выявить тенденции изменений ледовитости в Северном и Южном полушариях. В текстовом файле SII приведены значения площади ледяного покрова (в км²) без учета сплоченности льда. Изображения и таблицы формируются на основе ежедневных наблюдений с ноября 1978 г. и публикуются с суточной и месячной дискретностью⁴. Для анализа тенденций эксперты рекомендуют использовать ежемесячные данные, поскольку ежедневные содержат ошибки, которые устраняются в результате последующей обработки, т. е. не в оперативном режиме.

¹ FSEI HE Sakhalin State University, Lenina Str., 290, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, 693008, e-mail: artusur@mail.ru

² FSBI “IMGIG FEB RAS”, Nauki Str., 1B, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, 693000, e-mail: vpishchalnik@rambler.ru

³ SakhalinNIPI Oil and Gas, Amurskaya str., 53, 693000, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, e-mail: varomanyuk2020@gmail.com

⁴ Национальный центр данных по снегу и льду. Электронный ресурс: https://www.nsidc.org/data/seaice_index/ (дата обращения 10.04.2022)

Отличительной особенностью данных SII является ежегодная фиксация льда в Беринговом море в августе-сентябре. По сведениям, представленным в Проекте «Моря» [Гидрометеорология..., 1999], такое явление для стандартного опорного периода 1961–1990 гг. было характерно только для сурового типа зим. В исследуемый временной период с 2006 по 2020 гг. к суровому типу зим было отнесено четыре сезона 2008, 2010, 2012 и 2013 гг. [Оганезов и др., 2021]. Вполне возможно, что фиксация льда в летний период обусловлена сложностями идентификации ледяного покрова при повышенной влажности атмосферы и условиями обработки данных: согласно алгоритму SII пиксель закрашивается белым (т. е. считается покрытым льдом полностью) при концентрации ледяного покрова $>15\%$ [Алексеева и др., 2020, Fetterer et al., 2017].

Исходными значениями для MASIE-NH (MASIE) являются данные интерактивной мультисенсорной системы картирования снега и льда (IMS), которые обрабатываются в Национальном ледовом центре США (USNIC) с использованием алгоритма NASA Team. Они архивируются в NSIDC и представлены в трех вариантах разрешения со стороны пикселя 1, 4 и 24 км (IMS Daily Northern Hemisphere Snow and Ice Analysis at 1 km, 4 km, and 24 km Resolutions data set) [USNIC, 2008]. Несмотря на то, что наблюдения IMS производятся с суточной дискретностью с 1997 г., алгоритм обработки MASIE был задействован только с 1 января 2006 г. для пространственного разрешения 4 км, а со 2 декабря 2014 г. – для разрешения 1 км. Важно отметить, что по условию алгоритма обработки MASIE пиксель считается полностью покрытый льдом, если концентрация льда составляет $>40\%$ [USNIC, 2008]. Особенностью обработки данных алгоритмом MASIE является то, что данные IMS являются результатом обработки нескольких источников спутниковых наблюдений, включая пассивные микроволновые снимки, дополненные результатами визуального анализа других источников, которые имеют экспертное завершение.

Таким образом, расчетные данные обоих алгоритмов обработки имеют одинаковую дискретность 1 сут., разное пространственное разрешение (25 и 4 км), различные количественные критерии условия отнесения пикселя к чистой воде или покрытому льдом (15 и 40 %). Поэтому ошибки в определении местоположения кромки SII, в зависимости от состояния атмосферы, в отдельных случаях могут достигать десяти и более километров от местоположения кромки, вычисленной аналитиком в MASIE. Кроме этого, существуют объективные сложности идентификации ледяного покрова методами пассивного микроволнового зондирования на фазе ледообразования (наличие мокрых ниласовых и молодых льдов, которые дополнительно увлажняются в результате активной штормовой деятельности (заплески волн и сжатие льда), а на фазе разрушения – наличием снежиц и луж на ледяных полях. Особенно большие ошибки могут возникать при фиксации редких и разреженных битых льдов высокой степени разрушенности (4–5 баллов). В обоих случаях мокрый ледяной покров и площадь «невидимых» зон на снимках спутниковой микроволновой радиометрии может составлять 10–17 % от площади исследуемой акватории [Алексеева и др., 2020]. Целью работы является выполнение сравнительного анализа ледовитости Берингова моря, рассчитанной по данным SII и MASIE.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основных исходных данных для сравнительного анализа использовались табличные значения ледяного покрова в км² (S) с дискретностью 1 сут. из архивов SII и MASIE, которые для удобства были переведены в ледовитость, выраженную в процентах относительно площади Берингова моря (2 315 тыс. км²) [Фролов, 1971]. Начало и окончание ледового сезона (15.10 и 22.07, соответственно) определены исходя из условий самой ранней и поздней фиксации льда по данным MASIE. Расчеты выполнялись для 14 сезонов с 2006 по 2020 гг., из которых 4 были отнесены к суровым, 5 к умеренным и 5 к мягким типам зим [Оганезов и др., 2021]. Данные SII и MASIE сводились в единую таблицу и далее обрабатывались методами статистического анализа для вычисления следящих характеристик для всего периода исследований: среднее значение ледовитости с

дискретностью 1 сут., абсолютная ($\Delta_{\text{абс}}$) и относительная ($\Delta_{\text{отн}}$) разность на каждые сутки с усреднением полученных значений и вычисление коэффициента корреляции ($k_{\text{кор.}}$).

За базовые были приняты данные MASIE. Абсолютное отклонение ($\Delta_{\text{абс}}$) рассчитывалось по формуле (1):

$$\Delta_{\text{абс}} = S_M - S_{\text{SII}} \quad (1)$$

где S_M – ледовитость по данным MASIE, S_{SII} – ледовитость по данным SII.

Относительное отклонение ($\Delta_{\text{отн}}$) рассчитывалось по формуле (2):

$$\Delta_{\text{отн}} = ((S_M - S_{\text{SII}}) / S_M) * 100 \% \quad (2)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на то, что пространственные разрешения данных различны, представленные на рис. 1 кривые среднесезонного хода ледовитости синфазны, что подтверждается высоким значением коэффициента корреляции (0,92). Кривая, построенная по данным SII, имеет более сглаженный вид и в период с 14.11 до 20.04 расположена ниже, чем кривая, построенная по данным MASIE, что, по-видимому, обусловлено отмеченными выше особенностями пассивного микроволнового зондирования [Алексеева и др., 2020]. Следуя этой же логике, можно объяснить и пересечение кривых на фазах интенсивного ледообразования и разрушения ледяного покрова (рис. 2, 3).

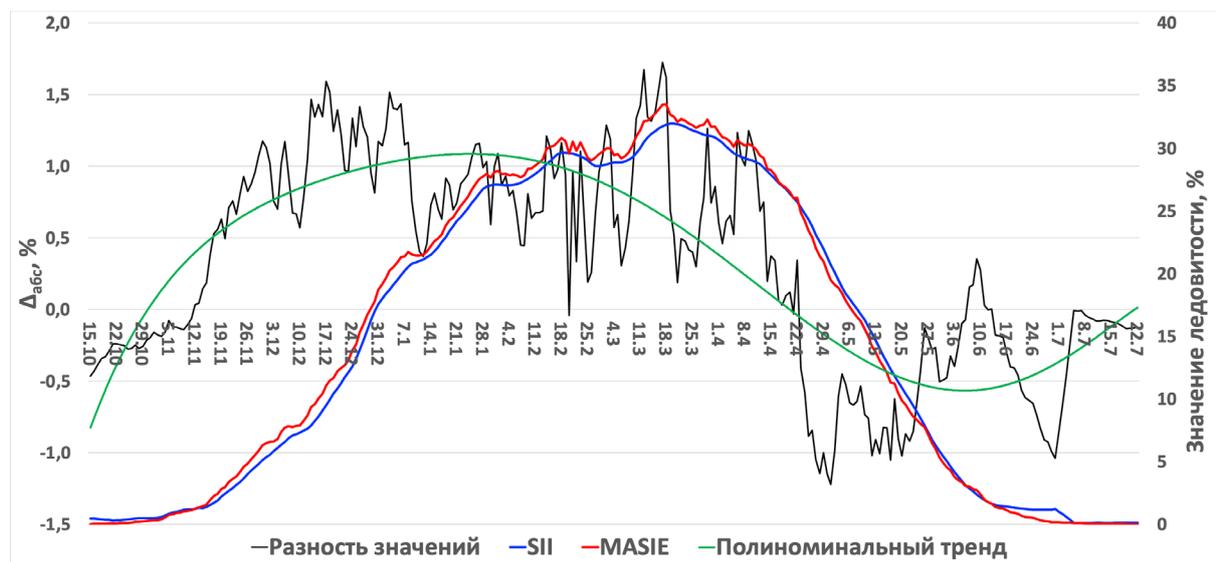
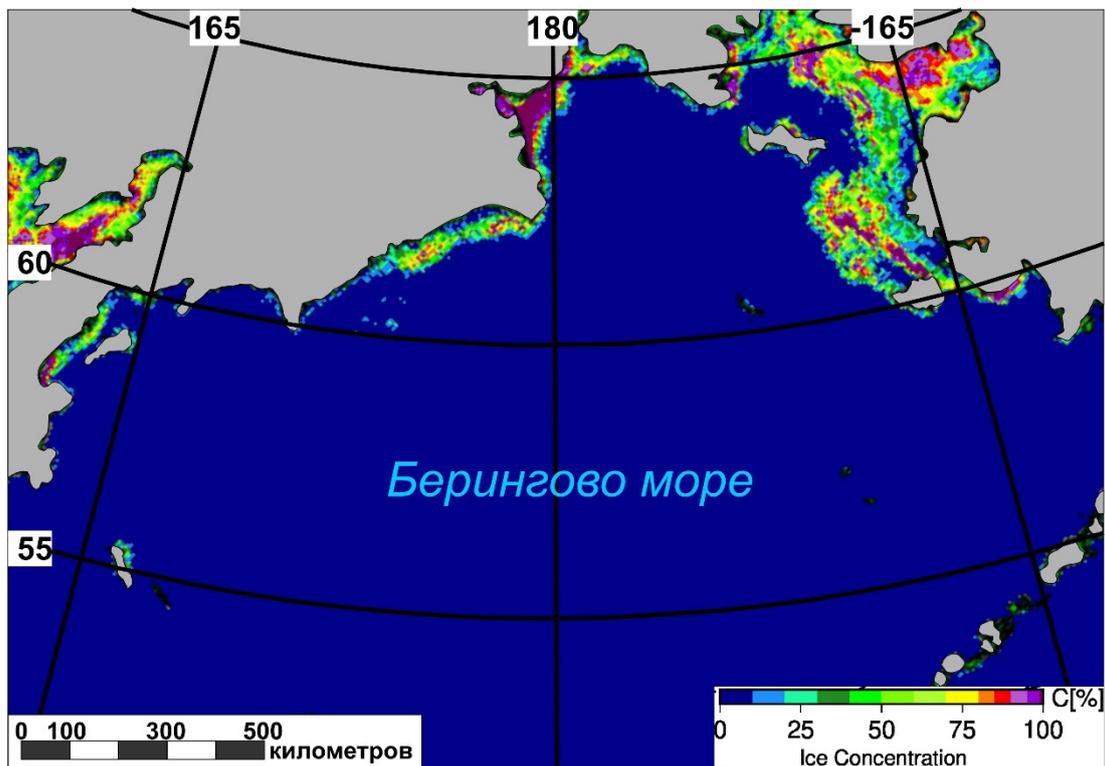


Рис. 1. Абсолютная разность средних значений сезонного хода ледовитости за период 2006–2020 гг.

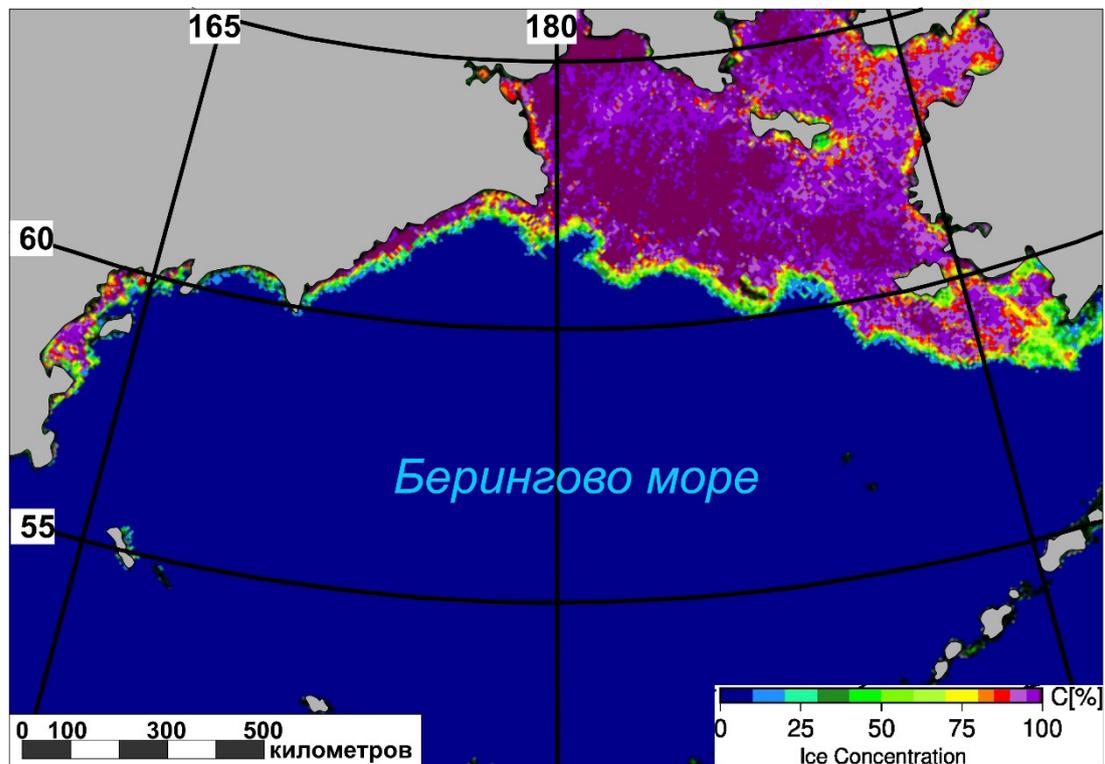
Fig. 1. The absolute difference between the average values of the seasonal course of ice cover for the period 2006–2020

Анализ кривых абсолютного отклонения средней сезонной ледовитости позволяет заключить, что наибольшие отличия значений наблюдаются на фазе максимального развития ледяного покрова (14 марта ~1,7 %). Наименьшие различия характерны для фазы разрушения ледяного покрова с максимумом 1 мая ~1,2 %. Разность абсолютных значений ($\Delta_{\text{абс}}$) находится в диапазоне от -1,7 до +1,2 %, что соответствует ~ 70 тыс. км² площади акватории и, по сути, находится в пределах точности расчетов ледовитости.

Следует также отметить, что на фазе разрушения ледяного покрова фиксируется более продолжительный период отрицательных колебаний разности абсолютных значений ($\Delta_{\text{абс}}$) ледовитости, чем на фазе активного ледообразования: три месяца и две недели, соответственно. Фаза максимального развития ледяного покрова характеризуется преимущественно положительными колебаниями разности абсолютных значений ($\Delta_{\text{абс}}$) ледовитости и находится в диапазоне от -0,05 до +1,72 %.



*Рис. 2. Фаза интенсивного ледообразования (02.01.2021).
Наличие большого количества молодого льда
Fig. 2. Phase of intense ice formation (02-Jan-2021).
The presence of a large amount of young ice*



*Рис. 3. Фаза разрушения ледяного покрова (30.04.2021)
Fig. 3. Ice cover destruction phase (30-Apr-2021)*

При рассмотрении относительного отклонения (рис. 4), также видны существенные различия значений в исходных данных на фазах интенсивного ледообразования и разрушения ледяного покрова. Наибольшие величины относительных отклонений отмечены на фазах развития (до 100 %) и разрушения ледяного покрова (до 110 %), что непосредственно связано с особенностями алгоритмов обработки данных. Относительные колебания в период с 01.01 по 20.04 (рис. 5) незначительны и в среднем составляют ~3 %, что по литературным данным близко к точности расчетов [Митник и др., 2015; Пищальник и др., 2016].

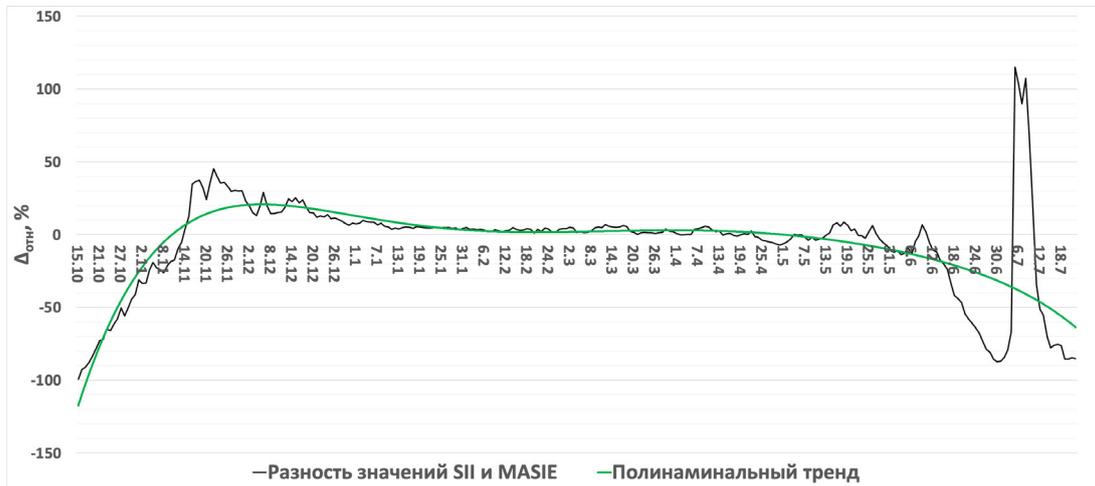


Рис. 4. Относительная разность средних значений сезонного хода ледовитости за период 2006–2020 гг.

Fig. 4. Relative difference between the average values of the seasonal course of ice cover for the period 2006–2020

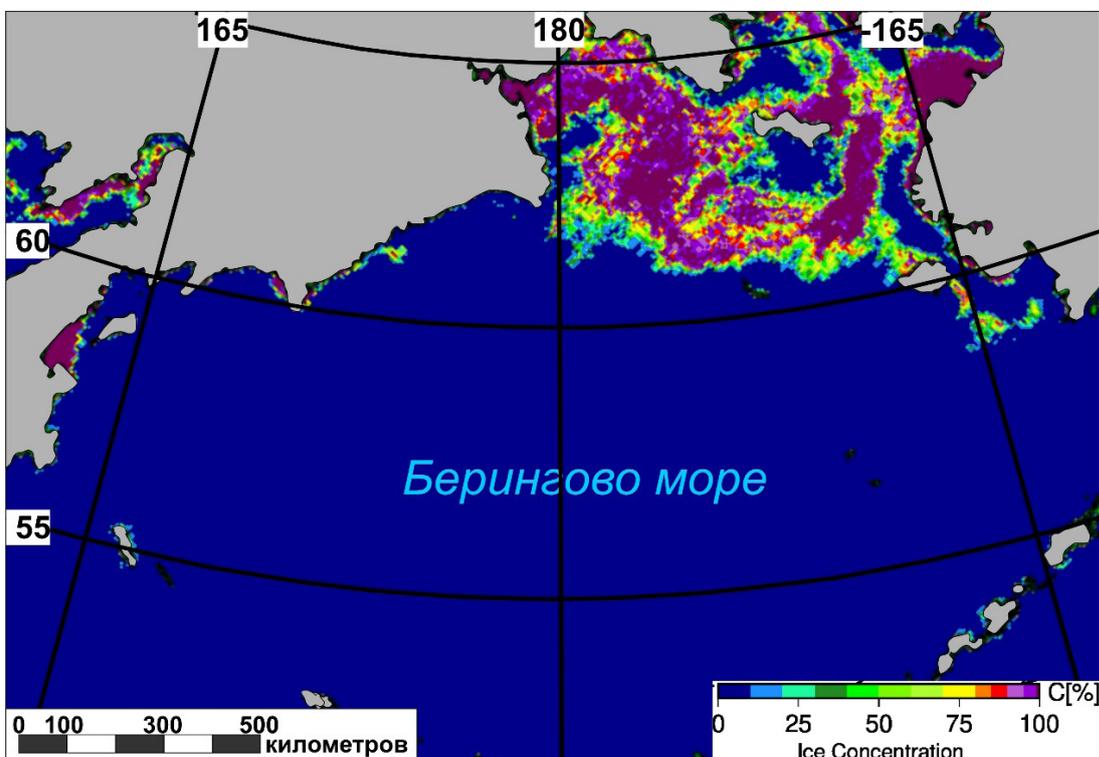


Рис. 5. Фаза максимального ледообразования (23.03.21).

Сформированный устойчивый ледяной покров в акватории Берингова моря

Fig. 5. Phase of maximum ice formation (23-Mar-21).

Formed a stable ice cover in the waters of the Bering Sea

ВЫВОДЫ

Сравнительный анализ ледовитости Берингова моря по данным SII и MAISE позволяет заключить, что разность значений ледовитости не является критичной и находится в пределах точности расчетов. Отличительной особенностью алгоритма MASIE является экспертное завершение процесса обработки данных, что позволяет решать научные и практические задачи в детализированном пространственном масштабе. При этом высокая корреляция значений ледовитости для Берингова моря позволяет использовать оба источника без введения поправочных коэффициентов, а ежемесячные данные SII рекомендовано использовать при анализе долгосрочных флуктуаций, поскольку они имеют более продолжительный ряд наблюдений (с 1978 г).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеева Т.А., Раев М.Д., Тихонов В.В., Соколова Ю.В., Шарков Е.А., Фролов С.В., Сероветников С.С. Сравнительный анализ площади морского льда в Арктике, полученной по данным спутниковой микроволновой радиометрии (алгоритм VASIA2) с ледовыми картами ААНИИ. Исследование Земли из космоса, 2020. № 6. С. 17–23. DOI: 10.31857/S0205961420060020.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 10. Берингово море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 1999. 298 с.
3. Митник Л.М., Трусенкова О.О., Лобанов В.Б. Дистанционное радиофизическое зондирование океана и атмосферы из космоса: достижения и перспективы (обзор). Вестник ДВО РАН, 2015 г. № 6. С. 5–20.
4. Оганезов А.С., Минервин И.Г., Пищальник В.М. Новый этап исследований ледового режима Берингова моря на основе спутниковых данных. НАУКА РОССИИ: цели и задачи. Сборник научных трудов по материалам XXVI международной научно-практической конференции 10 апреля 2021 г. Изд. НИЦ Л-Журнал, 2021. Ч. 3. С. 58–62. DOI: 10.18411/sr-10-04-2021-90.
5. Пищальник В.М., Романюк В.А., Минервин И.Г., Батухтина А.С. Анализ динамики аномалий ледовитости Охотского моря в период с 1882 по 2015 г. Известия ТИНРО, 2016. Т. 185. С. 228–239.
6. Фролов Ю.С. Новые фундаментальные данные по морфометрии Мирового океана. Вестник ЛГУ, 1971. № 6. С. 85–90.
7. Cavalieri D.J., Parkinson C.L., Gloersen P., Zwally H.J. Arctic and Antarctic Sea Ice Concentrations from Multichannel Passive-Microwave Satellite Data Sets: October 1978 – September 1995 User's Guide. NASA TM 104647, 1997. P. 17.
8. Fetterer F., Knowles K., Meier W.N., Savoie M., Windnagel A.K. Sea Ice Index, Version 3. NSIDC: National Snow and Ice Data Center, 2017. DOI: 10.7265/N5K072F8.
9. Meier W.N., Stewart J.S., Wilcox H., Hardman M.A., Scott D.J. Near-Real-Time DMSP SSMIS Daily Polar Gridded Sea Ice Concentrations, Version 2. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2021. DOI: 10.5067/YTTHO2FJQ97K.
10. USNIC (U.S. National Ice Center). IMS Daily Northern Hemisphere Snow and Ice Analysis at 1 km, 4 km, and 24 km Resolutions, Version 1. NSIDC: National Snow and Ice Data Center, 2008. DOI: 10.7265/N52R3PMC.

REFERENCES

1. Alekseeva T.A., Raev M.D., Tikhonov V.V., Sokolova Yu.V., Sharkov E.A., Frolov S.V., Serovetnikov S.S. Comparative analysis of the area of sea ice in the Arctic, obtained from satellite microwave radiometry (VASIA2 algorithm) with AARI ice maps. Research of the Earth from space, 2020. No. 6. P. 17-23 (in Russian). DOI: 10.31857/S0205961420060020 (in Russian).
2. Cavalieri D. J., Parkinson C.L., Gloersen P., Zwally H.J. Arctic and Antarctic Sea Ice Concentrations from Multichannel Passive-Microwave Satellite Data Sets: October 1978 – September 1995 User's Guide. NASA TM 104647, 1997. P. 17.

3. *Fetterer F., Knowles K., Meier W.N., Savoie M., Windnagel A.K.* Sea Ice Index, Version 3. NSIDC: National Snow and Ice Data Center, 2017. DOI: 10.7265/N5K072F8.
 4. *Frolov Yu.S.* New fundamental data on the morphometry of the World Ocean. Pushkin Leningrad State University Journal , 1971. No. 6. P. 85–90. (in Russian).
 5. Hydrometeorology and Hydrochemistry of Seas of the USSR. V. 10. The Bering Sea , Issue 1. Hydrometeorological Conditions. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1999. 298 p. (in Russian).
 6. *Meier W.N., Stewart J.S., Wilcox H., Hardman M.A., Scott D.J.* Near-Real-Time DMSP SSMIS Daily Polar Gridded Sea Ice Concentrations, Version 2. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2021. DOI: 10.5067/YTTHO2FJQ97K.
 7. *Mitnik L.M., Trusenkova O.O., Lobanov V.B.* Remote radiophysical sounding of the ocean and atmosphere from space: achievements and prospects (review). Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 2015. No. 6. P. 5–20. (in Russian).
 8. *Oganezov A.S., Minervin I.G., Pishchalnik V.M.* A new stage in research on the ice regime of the Bering Sea based on satellite data. Collection of scientific papers based on the materials of the XXVI International Scientific and Practical Conference April 10, 2021. Ed. SIC L-Journal, 2021. No. 3. P. 58–62 (in Russian). DOI: 10.18411/sr-10-04-2021-90.
 9. *Pishchalnik V.M., Romanyuk V.A., Minervin I.G., Batukhtina A.S.* Analysis of the dynamics of ice coverage anomalies in the Sea of Okhotsk in the period from 1882 to 2015. Izvestiya TINRO, 2016. V. 185. P. 228–239 (in Russian).
 10. USNIC (U.S. National Ice Center). IMS Daily Northern Hemisphere Snow and Ice Analysis at 1 km, 4 km, and 24 km Resolutions, Version 1. NSIDC: National Snow and Ice Data Center, 2008. DOI: 10.7265/N52R3PMC.
-