

Баклагин В.Н.¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕДОВОГО РЕЖИМА БЕЛОГО МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ NSIDC

АННОТАЦИЯ

Ледовые явления, возникающие на акваториях озер и морей, являются чувствительным индикатором регионального и глобального изменения климата, поэтому важно иметь представления о характере протекания ледового режима на озерах и морях, которые ежегодно частично или полностью покрываются льдом. В настоящее время только спутниковые данные могут дать информацию, которая необходима для пространственно-временного анализа ледовых характеристик водоемов. В работе представлены результаты анализа спутниковых данных о пространственном распределении льда Белого моря, представленных Национальным центром США по снегу и льду NSIDC. Сформирован временной ряд значений ледовитости Белого моря за период 2004–2017 гг. с шагом 1 день, на основании которого рассчитаны сроки и длительности ежегодно повторяющегося периода ледовых явлений на Белом море. Установлено, что акватория Белого моря ежегодно практически полностью покрывается льдом (92–97 % площади акватории) в зимнее время, а в летнее время полностью очищается ото льда. Показано, что ряд длительностей ежегодного периода ледовых явлений имеет незначительную изменчивость (коэффициент вариации составляет 10 %), в то время как показатель RICI в большей степени показателен (показатель вариации 21 %) для оценки влияния изменения климатических факторов на изменчивость ежегодного ледового режима Белого моря. Вместе с тем анализ спутниковых данных выявил погрешности в определении пространственного распределения льда в 2004–2005 гг., когда по данным NSIDC в летнее время были зафиксированы ледовые образования незначительных площадей (0,001–0,01 общей площади акватории). Данную погрешность необходимо учитывать при определении сроков и длительностей фаз ледового режима Белого моря.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: данные NSIDC, ледовый режим, ледовитость, Белое море.

Vyacheslav N. Baklagin²

STUDY OF THE ICE REGIME OF THE WHITE SEA BY SATELLITE DATA OF NSIDC

ABSTRACT

Ice phenomena occurring in the water areas of lakes and seas are a sensitive indicator of regional and global climate change, so it is important to have an idea of the nature of the ice regime on lakes and seas, which are partially or completely covered with ice every year. At present, only satellite data can provide the information that is necessary for a spatio-temporal analysis of the ice characteristics of water bodies. The paper presents results of the analysis of

¹ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», пр. А. Невского, д. 50, 185035, Петрозаводск, Россия, *e-mail*: slava.baklagin@mail.ru

² Northern Water Problems Institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, A. Nevskogo str., 50, 185035, Petrozavodsk, Russia, *e-mail*: slava.baklagin@mail.ru

satellite data on the spatial distribution of ice in the White Sea, presented by the National Snow and Ice Data Center (NSIDC). The time series of values of the ice coverage of the White Sea for the period 2004–2017 is formed with a step of 1 day, on the basis of which the timing and duration of the annual recurring period of ice phenomena on the White Sea are calculated. It is established that the water area of the White Sea is covered almost every year with ice (92–97 % of the water area) in winter, and in the summer it is completely cleared of ice. It is shown that a number of durations of the annual period of ice phenomena have insignificant variability (the coefficient of variation is 10 %), while the RIC1 indicator is more indicative (variation index 21 %) for estimating the influence of climatic factors on the variability of the annual ice regime of the White Sea. At the same time, the analysis of satellite data revealed errors in determining the spatial distribution of ice in 2004–2005, when according to NSIDC data ice formations of small areas (0.001–0.01 of the total area of the water area) were recorded in the summer. This error must be taken into account when determining the timing and duration of the phases of the ice regime in the White Sea.

KEYWORDS: data of NSIDC, ice regime, ice coverage, White sea.

ВВЕДЕНИЕ

Лед является индикатором изменения глобального и регионального климата, поэтому исследование ледового режима различных водоемов, в том числе морей, является важной экологической задачей [Clark et al., 1999; Johannessen et al., 2004; Karetnikov et al., 2008; Baklagin, 2017]. Исследование протекания ледового режима водоемов возможно путем анализа временного ряда значений его ледовитости (части акватории водоема, покрытого льдом). В связи с этим очень важно иметь информацию о ледовых явлениях на всей акватории водоема, а не только с отдельного поста наблюдения, расположенного на берегу. Ледовая ситуация на водоеме во время замерзания и вскрытия может меняться очень быстро (например, изменения ледовитости Белого моря могут составлять 0,1–0,3/день). Поэтому для анализа протекания ледового режима водоемов необходимо иметь данные на каждый день.

Современные методы получения информации о состоянии ледяного покрова водоемов предполагает использование спутниковых данных [Latifovic, Pouliot 2007]. Датчики спутников (MODIS, VIIRS, AIRS, MISR и многие другие) ежедневно выполняют многозональную съемку местности в различных диапазонах электромагнитной волны (видимом, инфракрасном, микроволновом) в течение нескольких последних лет (10–25 лет).

С высокой точностью можно рассчитать ледовитость озер визуально-экспертной оценкой, исходя из спутниковых снимков датчика MODIS, выполненных в видимом диапазоне (синтезированные RGB-изображения), обладающих высоким пространственным разрешением [до 250 м в открытом доступе: <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data>].

Однако в большинстве случаев выполнить расчет ледовитости озер по спутниковым снимкам видимого диапазона невозможно из-за наличия облачности.

Однако существуют многосенсорные СВЧ-радиометры, которые могут выполнять многозональную съемку в микроволновом диапазоне (ASMU-A, ATMS, AVHRR, MODIS, VIIRS и другие), что позволяет ежедневно фиксировать сцену вне зависимости от облачности. Результатом автоматического картирования многозональных снимков этих систем являются данные о снежном и ледяном покрове планеты. Несмотря на сравнительно невысокое пространственное разрешение (4–6 км), данные применимы для расчета ледовитости крупных озер (Онежское, Ладожское озера и многие другие) и морей (например, Белого моря).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Спутниковые данные, используемые в данном исследовании, представлены Национальным центром США по снегу и льду NSIDC [ftp://sidacs.colorado.edu/DATASETS/NOAA/G02156/]. Этот набор данных обеспечивает карты снежного покрова и ледяного покрова для Северного полушария с февраля 1997 г. по настоящее время в интерактивной мультисенсорной системе отображения снежного и ледового центра (IMS) Национального ледового центра. Он получен из множества продуктов данных, включая спутниковые снимки (спутников AQUA, DMSP, DMSP 5D-3/F17, GOES-10, GOES-11, GOES-13, GOES-9, METEOSAT, MSG, MTSAT-1R, MTSAT-2, NOAA-14, NOAA-15, NOAA-16, NOAA-17, NOAA-18, NOAA-N, RADARSAT-2, SUOMI-NPP, TERRA) и данные на месте. Данные представлены в форматах ASCII и GeoTIFF в трех разных разрешениях: 1, 4 и 24 км.

В настоящем исследовании для построения временного ряда значений ледовитости Белого моря применялись данные NSIDC о пространственном распределении льда за период 2004–2017 гг. с пространственным разрешением 4 км и временным шагом 1 день.

Расчет ледовитости Белого моря осуществлялся для каждого момента времени, на который имелись спутниковые данные, путем расчета сумм площадей всех однородных участков (льда и воды), соответствующих географическим координатам акватории Белого моря. Для более точного соответствия идентификация акватории Белого моря по географическим координатам производилась по сетке с пространственным разрешением 1 км.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчеты ледовитости Белого моря за период 2004–2017 гг. (рис. 1) по спутниковым данным NSIDC показали, что акватория Белого моря ежегодно почти полностью покрывается льдом (ледовитость почти достигает 1,0) и также ежегодно полностью очищается ото льда (ледовитость достигает 0,0). Однако в отличии, например, от крупных озер (таких как Онежское и Ладожское озера [Efremova et al., 2013]), находящихся на приблизительно равных широтах, ледовитость Белого моря никогда не достигает 1,0. Этот факт свидетельствует о том, что акватория Белого моря может полностью покрываться льдом, но при этом остаются некоторые участки, не покрытые льдом, – разломы и трещины (площадью 2–5 % от площади всей акватории). Такие трещины и разломы могут возникать вследствие отливных и приливных течений, а также в результате сильных ветровых явлений над акваторией Белого моря.

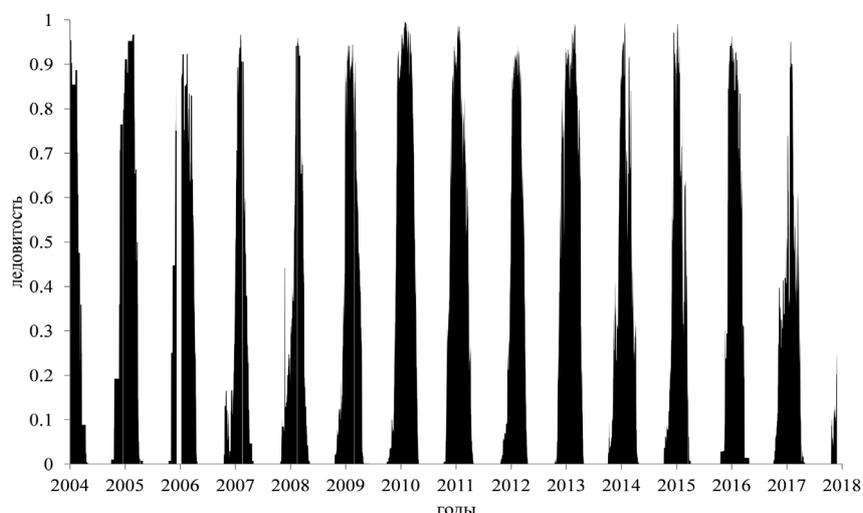


Рис. 1. Изменение ледовитости Белого моря за период 2004–2017 гг.
Fig. 1. Changes of ice coverage of the White Sea for the period 2004–2017

Анализ временного ряда значений ледовитости Белого моря (рис. 2) показал, что длительность ледовых явлений на акватории Белого моря в среднем составляет 202 дня, при этом коэффициент вариации равен 10 %. Это свидетельствует о том, что совокупность значений длительности ледовых явлений на Белом море является однородной. Этот факт может объясняться тем, что длительность протекания ледового режима Белого моря в не-большой степени зависит от изменения климата. Однако данное предположение требует исследования изменчивости ледового режима от климатических факторов (например, среднегодовой температуры воздуха на станциях).

Максимальная длительность ледовых явлений наблюдалась в 2008–2009 гг., когда ледовые явления на Белом море имели место 234 дня, в то время как самым коротким периодом ледовых явлений была зима в 2005–2006 гг., длительность составила лишь 163 дня. Среднестатистическая дата начала ледовых явлений на Белом море за период 2004–2017 гг. по спутниковым данным NSIDC соответствует 11 ноября. При этом самая ранняя дата начала ледовых явлений на Белом море соответствует 18.10.2013, а самая поздняя из данного периода – 10.12.2015. Среднестатистическая дата конца ледовых явлений на Белом море за период 2004–2017 гг. по спутниковым данным NSIDC соответствует 2 июня. При этом самая ранняя дата окончания ледовых явлений на Белом море соответствует 06.05.2015, в то время как самая поздняя – 07.07.2009.

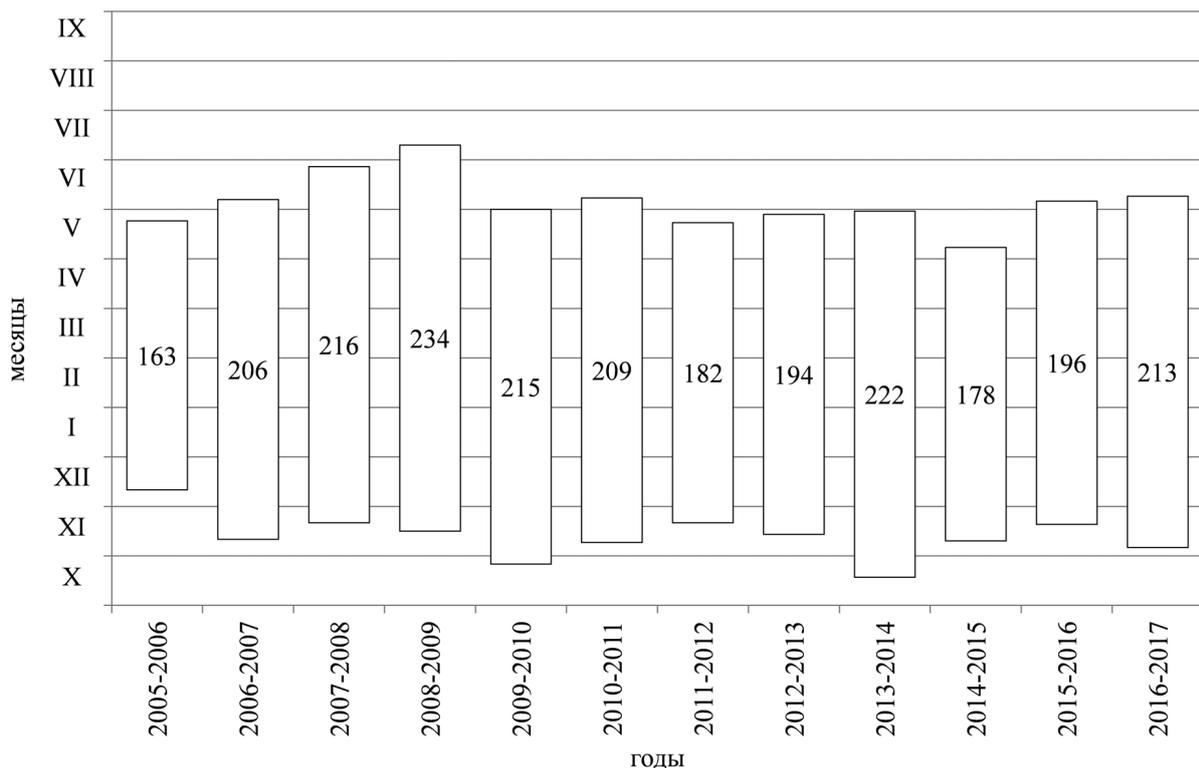


Рис. 2. Сроки и длительности ледовых явлений на Белом море за период 2004–2017 гг.

Fig. 2. Timing and duration of ice phenomena in the White Sea for the period 2004–2017

Также для Белого моря рассчитан показатель RICI за период 2004–2017 гг., используемый для оценки ледового периода Ладожского озера [Karetnikov et al., 2008]. На основании расчетов RICI было выявлено, что наиболее суровая зима наблюдалась в 2012–2013 гг. (RICI составляет 1,37), на рис. 1 этот факт иллюстрирует столбец с наибольшей

площадью, соответствующий 2012–2013 гг. Также достаточно морозные зимы наблюдались в 2005–2006 гг. (1,18), 2009–2010 г. (1,24), 2010–2011 г. (1,16). Наиболее теплая зима за период 2004–2017 гг. наблюдалась в 2007–2008 гг. (0,73), также теплые зимы наблюдались в 2006–2007 гг. (0,76), в 2016–2017 гг. (0,77). При этом необходимо отметить, что коэффициент вариации полученного ряда RICI для Белого моря за период 2004–2017 гг. составляет 21 %. Таким образом, данный ряд более изменчив, чем ряд значений длительности ледового режима. Этот факт свидетельствует о том, что характеристика RICI более показательна при оценке влияния климатических факторов, чем длительность ледового режима.

Необходимо также отметить то, что установить даты начала и конца ледовых явлений Белого моря в 2004–2005 гг. по спутниковым данным NSIDC не удалось. Значения ледовитости Белого моря за период 2004–2005 гг. по спутниковым данным NSIDC не достигали 0 (даже в летнее время значения ледовитости составляли 0,001–0,01). Это не соответствует действительности, поскольку Белое море в летнее время полностью освобождается ото льда. Данный факт свидетельствует о погрешности в определении пространственного распределения льда Белого моря при функционировании алгоритма автоматического распознавания льда. Поэтому при определении сроков и длительностей фаз ледового режима Белого моря необходимо учитывать данную ошибку.

В целом за период наблюдений 2005–2017 гг. (без учета 2004 г. с ошибочными значениями ледовитости) ледовые явления на Белом море имели место 2422 дня, что соответствует 52,2 % всего временного интервала.

ВЫВОДЫ

На основании спутниковых данных NSIDC установлено, что Белое море ежегодно циклично почти полностью покрывается льдом (ледовитость составляет 92–97 %) и в летнее время полностью освобождается ото льда. Исключением является 2004–2005 гг. – в этот интервал времени имеются погрешности в определении пространственного распределения льда на Белом море по спутниковым данным NSIDC, вследствие чего наблюдается малое количество льда (ледовитость 0,001–0,01) даже в летнее время.

Также по спутниковым данным NSIDC установлено, что в значительной степени наиболее изменчивой (чувствительной) характеристикой протекания ледового режима является показатель RICI (коэффициент вариации составляет 21 %) в сравнении с длительностью периода ледовых явлений (коэффициент вариации составляет 10 %) на Белом море.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках госзадания ФАНО России, тема № 86 «Закономерности изменений экосистем Белого моря при интенсификации освоения Арктической зоны региона и под влиянием изменений климата», № государственной регистрации (0223-2015-0008) 2018–2019–2020 гг.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out within the framework of the FASO Russia state task, theme No 86, No of state registration (0223-2015-0008) 2018–2019–2020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Baklagin V.N.* Selection of Parameters and Architecture of Multilayer Perceptrons for Predicting Ice Coverage of Lakes // *Ekológia (Bratislava)*. 2017. V. 36, issue 3. P. 226–234. DOI: <https://doi.org/10.1515/eko-2017-0019>.

2. *Clark P.U., Alley R.B., Pollard D.* Northern Hemisphere Ice-Sheet Influences on Global Climate Change // *Science*. 1999. V. 286, issue 5442. P. 1104–1111. DOI: 10.1126/science.286.5442.1104.
3. *Efremova T., Palshin N., Zdrovennov R.* Long-term characteristics of ice phenology in Karelian lakes // *Estonian Journal of Earth Sciences*. 2013. V. 62, issue 1. P. 33–41. DOI: 10.3176/earth.2013.04.
4. *Johannessen O.M., Bengtsson L., Miles M.W., Kuzmina S.I., Semenov V.A., Alekseev G.V., Nagurnyi A.P., Zakharov V.F., Bobylev L.P., Pettersson L.H., Hasselmann K., Cattle H.P.* Arctic climate change: observed and modelled temperature and sea-ice variability // *Tellus*. 2004. V. 56, issue 4. P. 328–341. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2004.00060.x>.
5. *Karetnikov S.G., Naumenko M.A.* Recent trends in Lake Ladoga ice cover // *Hydrobiology*. 2008. V. 599, issue 1. P. 41–48. DOI: 10.1007/978-1-4020-8379-2_5.
6. *Latifovic R., Pouliot D.* Analysis of climate change impacts on lake ice phenology in Canada using the historical satellite data record // *Remote Sensing of Environment* 2007. V. 106, issue 4. P. 492–507. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.015/>