

Изменчивость ледовитости Онежского озера в период 2000–2018 гг. по спутниковым данным

© 2018 г. В.Н. Баклагин

Институт водных проблем Севера, Карельский научный центр РАН, Петрозаводск, Россия
slava.baklagin@mail.ru

Variability of the Lake Onega ice coverage in the period 2000–2018 according to the satellite data

V.N. Baklagin

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia
slava.baklagin@mail.ru

Received February 4, 2018

Accepted May 27, 2018

Keywords: *ice cover, ice coverage, ice phenomena, Lake Onega, satellite data.*

Summary

Studying of characteristics of the Lake Onega ice regime and investigating of the climate influence on the formation and destruction of the ice cover requires a continuous chronological series of data on the Lake ice coverage. Ice cover is the percentage of the ice area to the total area of the lake. In 1955–1990, calculations of the ice coverage of the Lake were based on the use of the results of airborne ice reconnaissance. On average for this period, from 5 to 15 values were annually obtained, which was not enough for a comprehensive analysis of the ice coverage variability. In this paper, for the first time, a daily series of values of the ice coverage of the Lake Onega for the period 2000–2018 had been formed basing on the results of a combined analysis of the following satellite data sets: NSIDC, NOAA NESDIS, corrected by data of the satellite MODIS sensor. Values from November to May were grouped from the above data sets without regards for years of observations, and then the regression analysis of these values made possible to create a model (a polynomial of the 8th degree) of the chronological course of the ice coverage during the period of the ice phenomena existence on the Lake Onega. The coefficient of determination of the model is 0.74, and the error in determining the ice coverage is 21%. The average dates of the beginning, end, and duration of periods of the formation (from November 25th to January 19th), the destruction (from April 13th to May 17th) of the ice cover, as well as the total freeze-up time (from January 20th to April 12th) on the Lake Onega for the period 2000–2018 was determined. The period of ice phenomena on the Lake Onega on average lasts for almost half a year (175 days), of which a significant part of the time is a complete freeze-up (84 days). It was found that the rate of formation of the ice cover (1.76% per day) on the Lake Onega is 1.65 times smaller than the rate of its destruction (2.90% per day), which approximately corresponds to similar results obtained for the Lake Ladoga (1.5 times).

Citation: V.N. Baklagin. Variability of the Lake Onega ice coverage in the period 2000–2018 according to the satellite data. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018. 58 (4): 552–558. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-552-558.

Поступила 4 февраля 2018 г.

Принята к печати 27 мая 2018 г.

Ключевые слова: *ледовитость, ледовые явления, ледяной покров, Онежское озеро, спутниковые данные.*

Впервые получен непрерывный суточный ряд значений ледовитости Онежского озера за 2000–2018 гг. на основе результатов комбинированного анализа наборов спутниковых данных NSIDC, NOAA NESDIS, скорректированных спутниковыми данными MODIS. Представлена регрессионная модель хронологического хода ледовитости в период ледовых явлений на Онежском озере.

Введение

Ледяной покров на озёрах влияет на обменные процессы между атмосферой и водной поверхностью: снижает поступление солнечного света, необходимого для фотосинтеза, затрудняет теплообмен и насыщение воды кислородом. Условия протекания ледового режима на озёрах определяют сроки навигационного периода, а также возможность транспортировки людей и/или грузов

по установившемуся льду [1]. Онежское озеро — одно из крупнейших озёр Европы, площадь его акватории составляет 9720 км². Формирование и разрушение ледяного покрова на Онежском озере входит в состав ежегодного гидрологического цикла, поэтому характер протекания ледового режима служит индикатором изменения регионального и глобального климата [2–5]. Сведения о ледовом режиме Онежского озера позволяют установить влияние климатических факторов на

формирование и разрушение ледяного покрова [4]. Эти данные можно использовать при прогнозировании площадей ледовых образований [6] для решения практических задач, связанных с организацией сообщения водного транспорта между населёнными пунктами (Петрозаводск, Медвежьегорск, Кондопога, Повенец, Вытегра, Вознесенье), а также в Беломоро-Балтийском и Волго-Балтийском каналах [4]; необходимы они и при организации рыбного промысла.

Оценка ледового режима на озёрах предусматривает анализ хронологического ряда значений ледовитости озёр. Ледовитость — это отношение площади (в процентах), занятой льдом (с учётом сплочённости плавучего льда), к общей площади озера [7]. Расчёты ледовитости крупных озёр (Онежского и Ладожского озёр, оз. Байкал, Зейского водохранилища) авторы работы выполнили по результатам ледовых авиаразведок, а также телевизионных съёмок с ИСЗ «Метеор» [7]. В этой работе приведены справочные материалы по ледовому режиму исследуемых озёр, в частности, для Онежского озера собраны и обобщены данные за период наблюдений с 1955 по 1982 г. Они имеют большой научный и практический интерес, однако отметим, что в среднем число полученных значений ледовитости составляет 11–12 значений в год, что соответствует одному значению на 13–14 дней в период ледовых явлений. При этом по данным датчика MODIS максимальное изменение ледовитости Онежского озера за сутки в период 2000–2018 гг. равно 62,5% (зафиксировано 15 и 16 декабря 2010 г.).

В 1955–1990 гг. наблюдениями за пространственным распределением льда занимался отдел авиационных исследований Северо-Западного управления государственного комитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды, на основании которых были выделены наиболее типичные ледовые образования [8]. Получены картограммы распределения льда на Онежском озере (сняты с карт масштаба 1:1 250 000) в результате съёмки с самолёта ИЛ-14. С помощью этих данных рассчитаны значения ледовитости Онежского озера на даты съёмок. Вместе с тем полученный ряд также недостаточно подробен (5–10 снимков в год). Таким образом, для получения достоверных сведений о начале и конце периодов формирования и разрушения ледовых образований, а также уточнения зависимостей из-

менения ледовитости Онежского озера от климатических факторов и расчётов индексов RICI [1] для Онежского озера имеющихся данных явно недостаточно — необходим более подробный хронологический ряд значений ледовитости.

Современные методы получения информации о ледяном покрове озёр предполагают использование материалов спутниковых наблюдений. В последние годы с помощью спутников ведётся ежедневная съёмка Земли в различных диапазонах (видимом, инфракрасном, микроволновом), что позволило накопить большой объём данных, в том числе о снежном и ледяном покровах планеты. Имеются спутниковые данные в микроволновом диапазоне (предоставлены Национальным центром данных по снегу и льду NSIDC, Центром спутниковых приложений и исследований NOAA NESDIS), что очень важно, так как позволяет независимо от погодных условий получать информацию о ледяном покрове исследуемого озера.

Задачи настоящей работы — формирование суточного ряда значений ледовитости Онежского озера на основе наборов спутниковых данных NSIDC, NOAA NESDIS, датчика MODIS за 2000–2018 гг. и расчёт статистических характеристик периода ледовых явлений на Онежском озере.

Материалы и методы

Для расчёта ледовитости Онежского озера применялись наборы спутниковых данных NSIDC, NOAA NESDIS, а также датчика MODIS. Спутниковые снимки датчика MODIS (на платформах спутников TERRA и AQUA) видимого диапазона (пространственное разрешение 250 м) на основе визуально-экспертной оценки позволяют достоверно рассчитать значение ледовитости, однако для расчётов можно использовать только снимки, полученные в ясную погоду. В настоящем исследовании использованы готовые RGB-синтезированные изображения, полученные каналами 1 (620–670 нм), 3 (459–479 нм), 4 (545–565 нм) датчика MODIS. За период 2000–2018 гг. отобрано 1104 снимка, а также ещё 210 снимков с частичной облачностью, для которых с помощью анализа предыдущих и последующих дней достоверно выполнен расчёт ледовитости. Так, в ходе визуальной оценки спутниковых снимков Онеж-

ского озера датчика MODIS установлено, что в первую очередь льдом покрывается Челмужская губа, затем — Великая и Уницкая губа и только после этого льдом начинает покрываться Заонежский залив. Полученные сведения использованы при анализе снимков с частичной облачностью.

На основе спутниковых данных о ледяном покрове Онежского озера NSIDC и NOAA NESDIS (пространственное разрешение 4–6 км) сформированы непрерывные суточные ряды значений ледовитости Онежского озера за период 2000–2018 гг. Анализ показал, что данные NSIDC и NOAA NESDIS содержат разные результаты (среднее значение абсолютных отклонений ледовитости Онежского озера составляет 18,9%). Отмечаются ошибки и при сравнении со значениями ледовитости, рассчитанными по данным MODIS (средние значения абсолютных отклонений ледовитости, полученные по данным NSIDC и NOAA NESDIS, составляют соответственно 4,9 и 16,1%). Более детальный анализ показал, что незначительная ошибка при определении ледовитости по этим данным возникает во время полного ледостава (0,5 и 15,5%) и открытой воды (2,6 и 2,9%). Однако в периоды формирования и разрушения ледяного покрова на Онежском озере имеют место грубые ошибки (соответственно до 41 и до 27%). В связи с этим при формировании суточного ряда значений ледовитости Онежского озера результаты данных NSIDC и NOAA NESDIS корректировались значениями ледовитости, полученными по данным MODIS (контрольные значения). В частности, в дни, когда по данным MODIS из-за погодных условий невозможно было рассчитать ледовитость, использованы результаты данных NSIDC или NOAA NESDIS с учётом их отклонений от контрольных значений в предыдущем и последующем днях, для которых получены значения ледовитости по данным MODIS. Значение ледовитости I_t в момент времени t вычисляется корректировкой значений ледовитости, полученных по данным NSIDC и NOAA NESDIS с учётом линейного нормирования от 0 до 1:

$$I_t = \begin{cases} I_{xt}(1 + \delta_{xt}), & \delta_{xt} < 0 \\ (1 - \delta_{xt})(I_{xt} + \delta_{xt}) + \delta_{xt}^2, & \delta_{xt} \geq 0, \end{cases}$$

где I_{xt} — корректируемое значение ледовитости в момент времени t по данным NSIDC или NOAA

NESDIS; δ_{xt} — взвешенное отклонение в момент времени t , рассчитываемое по формуле

$$\delta_{xt} = (\delta_{x1}(t_2 - t) + \delta_{x2}(t - t_1))/(t_2 - t_1),$$

где t_1, t_2 — соответственно предыдущая и последующая даты относительно t , для которых имеются данные MODIS; δ_{x1}, δ_{x2} — отклонения в моменты времени t_1 и t_2 соответственно, рассчитываются по формуле $\delta = I_c - I_x$, где I_c — контрольное значение.

Для каждого интервала времени между t_1 и t_2 применялись значения ледовитости, рассчитанные по данным NSIDC ($I_x = I_{\text{NSIDC}}$, $\delta_x = \delta_{\text{NSIDC}}$), при выполнении условия $|\delta_{\text{NSIDC}1}| + |\delta_{\text{NSIDC}2}| \leq |\delta_{\text{NESDIS}1}| + |\delta_{\text{NESDIS}2}|$; в противном случае для данного интервала использовались значения ледовитости, рассчитанные по данным NOAA NESDIS ($I_x = I_{\text{NESDIS}}$, $\delta_x = \delta_{\text{NESDIS}}$).

Результаты и обсуждения

Сформированный суточный ряд значений ледовитости Онежского озера по спутниковым данным NSIDC, NOAA NESDIS и датчика MODIS за период 2000–2018 гг. представлен на рис. 1. Среднее значение суточного изменения ледовитости в период ледовых явлений составляет 1,55%, максимальное — 62,5% (15 и 16 декабря 2010 г. при замерзании озера). Среднее значение ледовитости в период ледовых явлений — 66,9%, за календарный год — 33,3%. Значения ледовитости Онежского озера сгруппированы в интервал времени с ноября по май без учёта года наблюдения, и функция их распределения аппроксимирована полиномом 8-й степени методом наименьших квадратов (рис. 2):

$$I = 4,5601 \cdot 10^{-16} t^8 - 5,7170 \cdot 10^{-13} t^7 + 3,0331 \cdot 10^{-10} t^6 - 8,8745 \cdot 10^{-8} t^5 + 1,5638 \cdot 10^{-5} t^4 - 1,6999 \cdot 10^{-3} t^3 + 0,1117 t^2 - 4,0700 t + 63,2021,$$

где t — номер дня в году, начиная с 1 сентября.

Коэффициент детерминации полученной регрессионной модели составляет 0,74 (достоверность коэффициента детерминации при уровне надёжности 99% подтверждена коэффициентом Фишера $1096,7 > 0,2$). Стандартная ошибка для оценки ледовитости, согласно уравнению регрессии, составляет 21%. Увеличение степени полинома аппроксимирующей функции (больше 8)

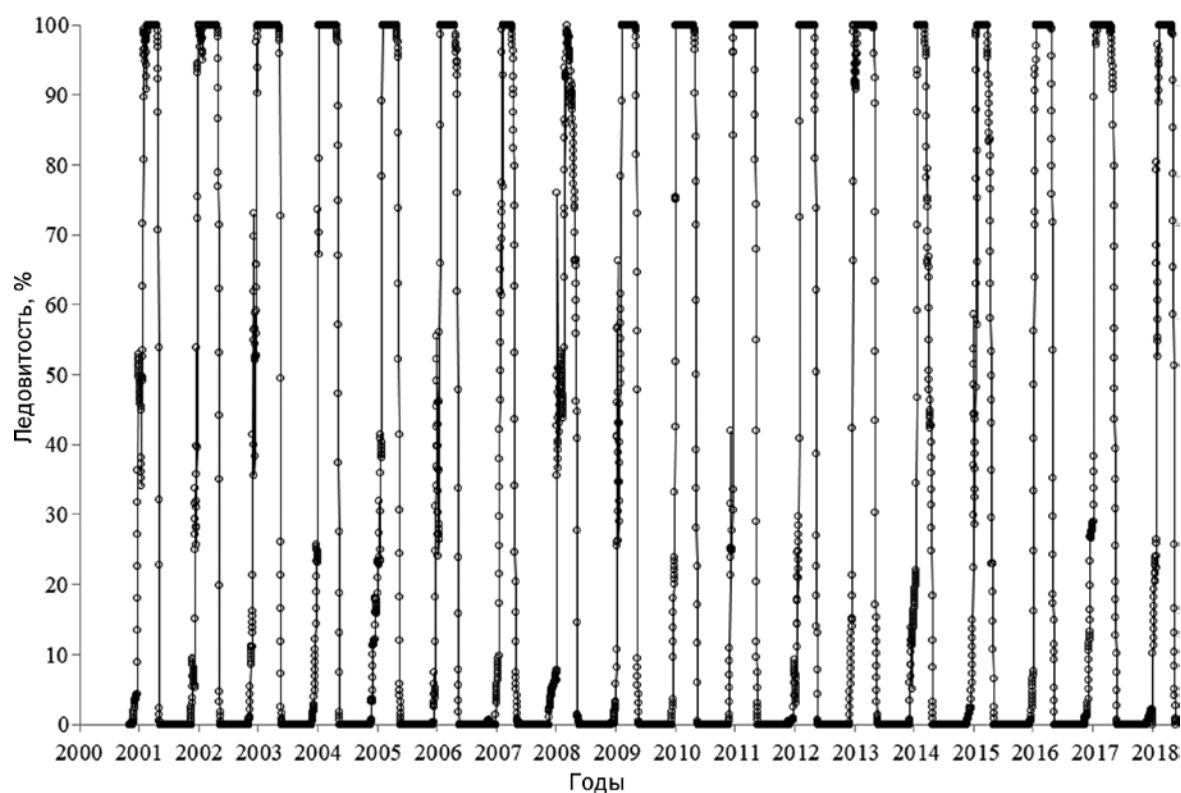


Рис. 1. Суточный ряд значений ледовитости Онежского озера за период 2000–2018 гг.

Fig. 1. The daily series of ice coverage of Lake Onega for the period 2000–2018

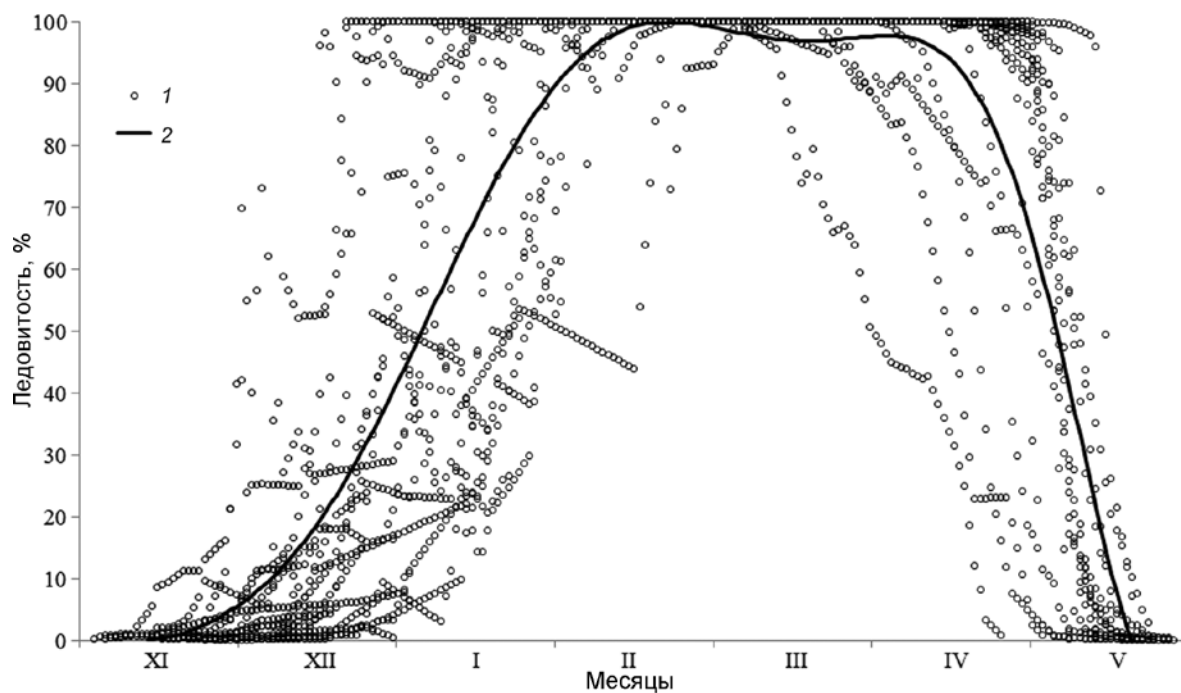


Рис. 2. Значения ледовитости (1), рассчитанные за период 2000–2018 гг., и аппроксимации функции их распределения (2) методом наименьших квадратов

Fig. 2. Values of ice cover (1), calculated for the period 2000–2018, and approximation of their distribution function (2) by the method of least squares

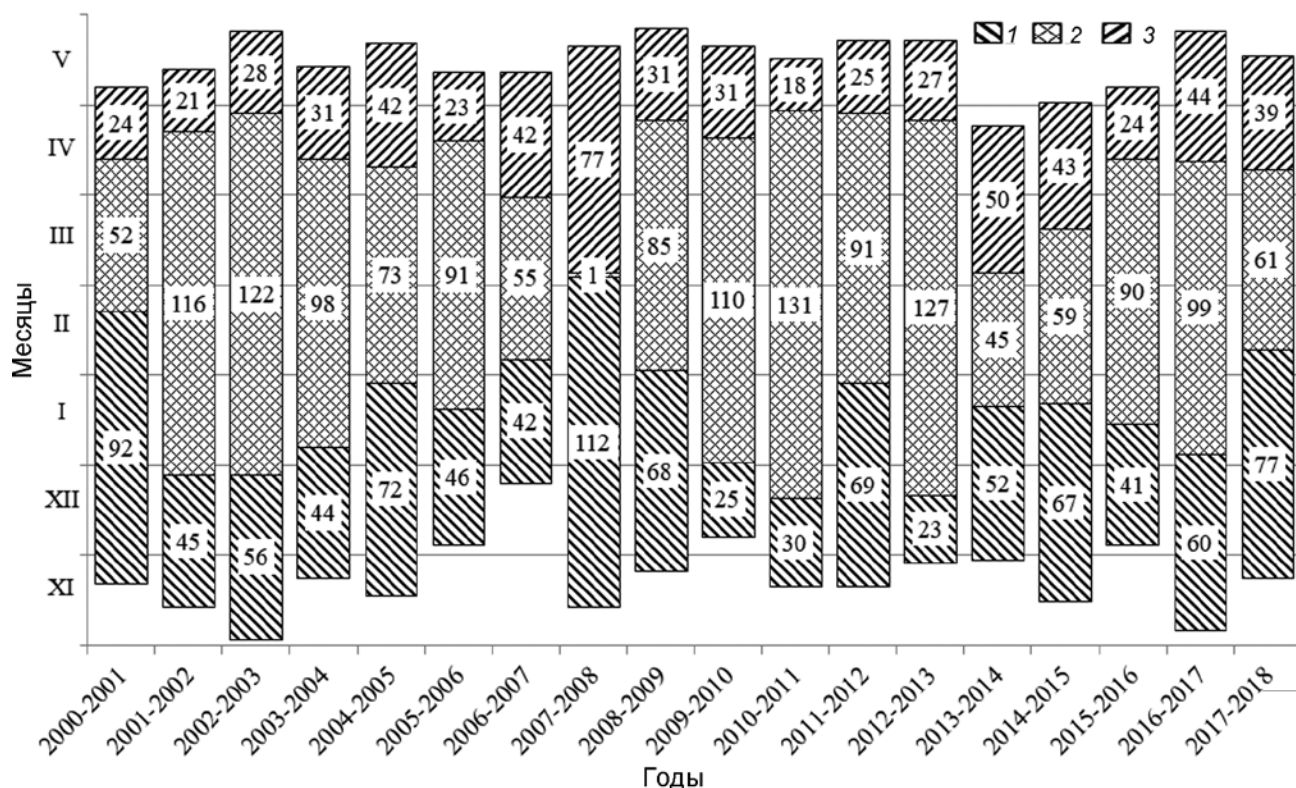


Рис. 3. Даты начала, конца и продолжительности (с указанием числа дней) периодов формирования (1), разрушения (3) ледяного покрова и полного ледостава (2) на Онежском озере за период 2000–2018 гг.

Fig. 3. The dates of the beginning, end and duration (with the number of days) of the periods of formation (1), destruction (3) ice cover and total freeze-up (2) on Lake Onega for the period 2000–2018

не привело к значительному росту коэффициента детерминации. На основании анализа ряда значений ледовитости Онежского озера определены даты начала и конца ледостава, продолжительности периодов формирования и разрушения ледяного покрова, а также полного ледостава. Результаты представлены в виде диаграммы на рис. 3.

При определении начала и конца периодов формирования и разрушения ледяного покрова полагали, что период формирования ледяного покрова характеризуется повышением ледовитости с 0 до 100%, полный ледостав – это 100%, период разрушения ледяного покрова – снижение ледовитости со 100 до 0% [9]. Статистические характеристики периодов формирования, разрушения ледяного покрова, а также полного ледостава Онежского озера (среднее значение, стандартное отклонение, коэффициент вариации) приведены в таблице. Установлено, что значения длительности периода ледовых явлений на Онежском озере (2000–2018 гг.) колеблются в широком диапазоне (размах составляет 67 дней). При этом самая ран-

няя дата начала ледовых явлений на Онежском озере зафиксирована 6 ноября 2016 г., а самая поздняя – 26 декабря 2006 г. (размах составляет 53 дней). Самая ранняя дата конца ледовых явлений – 26 апреля 2014 г., а самая поздняя – 29 мая 2009 г. (размах составляет 33 дня). Интересно, что средние значения продолжительности периодов ледовых явлений на Онежском и Ладожском озёрах равны 175 дней и 172 дня соответственно [1].

Онежское озеро ежегодно полностью покрывается льдом (ледовитость составляет 100%). При этом полный ледостав – наиболее продолжительный период (среднее значение 84 дня) по сравнению с периодами формирования и разрушения ледяного покров. Скорость разрушения (2,90%/день) приблизительно в 1,65 раза выше скорости формирования (1,76 %/день) ледяного покрова на Онежском озере. Для Ладожского озера это отношение составляет 1,5 [1], что объясняется действием ветра, который постоянно разрушает ледовые образования, не давая им сплотиться. Установлено, что в период разруше-

Таблица. Статистические характеристики периодов формирования, разрушения ледяного покрова и полного ледостава на Онежском озере за период 2000–2018 гг.

Характеристика	Среднестатистические даты начала и конца периода	Среднее значение продолжительности, дни	Стандартное отклонение, дни	Коэффициент вариации, %
Формирование ледяного покрова	25 ноября–19 января	57	23	41
Полный ледостав	20 января–12 апреля	84	34	40
Разрушение ледяного покрова	13 апреля–17 мая	34	14	41
Период ледовых явлений	25 ноября–17 мая	175	18	11

ния (в отличие от периода формирования) ледяного покрова функция изменения ледовитости Онежского озера с течением времени удовлетворяет условию монотонности, т.е. значения ледовитости монотонно убывают от 100 до 0%. Однако в редких случаях ледовитость может возрасти на 1–2%. Визуальный анализ снимков показал, что такой эффект достигается при движении ледовых образований по акватории озера, когда в результате сильного ветра раздробленные льды скапливаются вдоль одного берега, наползают друг на друга и в итоге ледовитость уменьшается. Однако, когда ледовые образования вновь выносятся в открытую часть акватории, ледовитость несколько повышается.

Аномальным при оценке особенностей ледового режима Онежского озера был 2008 г., когда полный ледостав (ледовитость 100%) длился всего один день, что не типично для данного озера. При этом на основе спутниковых данных NOAA NESDIS в 2008 г. ледостава не было вообще, однако детальный анализ снимков датчика MODIS от 5 марта 2008 г. зафиксировал, что лёд полностью покрыл всю акваторию Онежского озера. Данному явлению способствовало наличие трещины, проходящей через всю акваторию от Петрозаводской губы и залива Большое Онего к южной части озера. На один день эта трещина покрывалась тонким льдом, после чего лёд разрушился.

Анализ значений RICI для Онежского озера, рассчитанных по методике, аналогичной для Ладожского озера [1], за период 2000–2018 гг. показал, что наиболее суровые условия наблюдались зимой 2010/11 г. (1,3), а наиболее тёплые – в 2007/08 (0,79), 2008/09 (0,80) и 2013–2017 гг. (0,73). В период ледовых явлений 2010/11 г. зафиксирована максимальная продолжительность полного ледостава (129 дней), чем объясняется высокое значение RICI, несмотря на то, что продолжительность периода ледовых явлений в эту зиму (179 дней) чуть выше среднего значения (175 дней).

В тёплые зимы 2007/08, 2008/09 и 2013/14 гг. ледовый режим был разным. Зимой 2007/08 г. длительность полного ледостава была равна 55 дням, что меньше среднего значения (78 дней), но не является минимальным (1 день), в то время как общая продолжительность периода ледовых явлений составляет 139 дней (минимальное значение). Зимой 2008/09 г. длительность полного ледостава – лишь 1 день, в то время как общая продолжительность периода ледовых явлений составляет 190 дней, что значительно выше среднего значения, однако, несмотря на это, значение RICI минимально.

Заключение

Анализ суточного ряда значений ледовитости Онежского озера за период 2000–2018 гг. показал, что ледовые явления и на Онежском озере, и на Ладожском [1] занимают почти половину времени в году (в среднем 47,9%). При этом значительную часть времени в период ледовых явлений (в среднем 47,8%) озеро полностью покрыто льдом. Онежское озеро ежегодно полностью покрывалось льдом в 2000–2018 гг. в отличие от Ладожского, на котором в 2014–2017 гг. не наблюдалось полного ледостава. Среднее значение изменения ледовитости Онежского озера за день в период ледовых явлений составляет 1,55%. Результаты анализа регрессионной модели хронологического хода ледовитости Онежского озера показали, что ледяной покров формируется (в среднем 57 дней) в 1,64 раза медленнее его разрушения (в среднем 34 дней). Данное соотношение приблизительно соответствует соотношению для Ладожского озера (1,5 раза) [1]. Из этого следует, что влияние ветра при формировании ледовых образований на Онежском озере также существенно, несмотря на наличие большего числа заливов по сравнению с Ладожским озером.

Анализ спутниковых данных датчика MODIS показал, что на Онежском озере за рассматриваемый период в первую очередь лёд всегда устанавливается в Челмужской и Великой губах и только после этого — в Заонежском заливе. Отметим, что большое число маршрутов водного транспорта (в Медвежьегорск, Повенец, а также Белое море) проходит по кратчайшему пути именно через Великую губу — с северо-западной стороны от о. Большой Клименский.

Проложение другого маршрута, например через залив Малое Онего (с юго-восточной стороны от о. Большой Клименский), позволит увеличить продолжительность навигационного периода на Онежском озере на 5–25 дней.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 14-17-00740-П.

Acknowledgments. The work was carried out with the financial support of the RSF grant № 14-17-00740-P.

Литература

1. Karetnikov S.G., Naumenko M.A. Recent trends in Lake Ladoga ice cover // *Hydrobiologia*. 2008. V. 599. № 1. P. 41–48. doi: 10.1007/s10750-007-9211-1.
2. Климат Карелии. Изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы / Ред. Н.Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 223 с.
3. Filatov N.N., Georgiev A.P., Efremova T.V., Nazarova L.E., Pal'shin N.I., Tolstikov A.V., Sharov A.N., Rukhovets L.A. Response of lakes in Eastern Fennoscandia and Eastern Antarctica to climate changes // *Doklady Earth Sciences*. 2012. V. 444. № 2. P. 752–755. doi: 10.1134/S1028334X1206013X.
4. Сало Ю.А., Назарова Л.Е. Многолетняя изменчивость ледового режима Онежского озера в условиях нестационарности регионального климата // *Изв. Русского географического общества*. 2011. Т. 143. Вып. 3. С. 50–55.
5. Филатов Н.Н., Назарова Л.Е., Георгиев А.П., Семенов А.В., Анциферова А.Р., Ожигина В.Н., Богдан М.И. Изменения и изменчивость климата европейского Севера России и их влияние на водные объекты // *Арктика: экология и экономика*. 2012. № 2 (6). С. 80–93.
6. Baklagin V.N. Selection of parameters and architecture of multilayer perceptrons for predicting ice coverage of lakes // *Ekológia (Bratislava)*. 2017. V. 36. № 3. P. 226–234. doi: 10.1515/eko-2017-0019.
7. Усачев В.Ф., Прокачева В.Г., Бородулин В.В. Оценка динамики озерных льдов, снежного покрова и речных заливов дистанционными средствами. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 103 с.
8. Бушуев В.И., Волков Н.А., Лоцилов В.С. Атлас ледовых образований. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 139 с.
9. Assel R., Cronk K., Norton D. Recent trends in Laurentian Great Lakes ice cover // *Climatic Change*. 2003. № 57. P. 185–204.

References

1. Karetnikov S.G., Naumenko M.A. Recent trends in Lake Ladoga ice cover. *Hydrobiologia*. 2008, 599 (1): 41–48. doi: 10.1007/s10750-007-9211-1.
2. *Klimat Karelii. Izmenchivost' i vliyaniye na vodnye ob'ekty i vodosbory*. Climate of Karelia. Variability and impact on water bodies and catchments. Ed. N.N. Filatov. Petrozavodsk: KarNC RAN, 2007: 223 p. [In Russian].
3. Filatov N.N., Georgiev A.P., Efremova T.V., Nazarova L.E., Pal'shin N.I., Tolstikov A.V., Sharov A.N., Rukhovets L.A. Response of lakes in Eastern Fennoscandia and Eastern Antarctica to climate changes. *Doklady Earth Sciences*. 2012, 444 (2): 752–755. doi: 10.1134/S1028334X1206013X.
4. Salo Yu.A., Nazarov L.E. Multiannual variability of the Onega Lake ice regime in conditions of variability of the regional climate. *Izvestiya Russkogo Geograficheskogo Obshchestva*. Proc. of the Russian Geographical Society. 2011, 143 (3): 50–55. [In Russian].
5. Filatov N.N., Nazarov L.E., Georgiyev A.P., Semenov A.V., Antsiferov A.R., Ozhigina V.N., Bogdan M.I. Changes and variability of climate in the European part of the Russian North and their effect on water facilities. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctic: ecology and economy. 2012, 2 (6): 80–93. [In Russian].
6. Baklagin V.N. Selection of parameters and architecture of multilayer perceptrons for predicting ice coverage of lakes. *Ekológia (Bratislava)*. 2017, 36 (3): 226–234. doi: 10.1515/eko-2017-0019.
7. Usachev V.F., Prokacheva V.G., Borodulin V.V. *Otsenka dinamiki ozernykh l'dov, snezhnogo pokrova i rechnykh zalivov distantsionnymi sredstvami*. Estimation of dynamics of lake ice, snow cover and river bays by remote means. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1985: 103 p. [In Russian].
8. Bushuev V.I., Volkov N.A., Loshchilov V.S. *Atlas ledovykh obrazovaniy*. Atlas of ice formations. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1972: 139 p. [In Russian].
9. Assel R., Cronk K., Norton D. Recent trends in Laurentian Great Lakes ice cover. *Climatic Change*. 2003, 57: 185–204.