

УДК 502.6;910.3

О ЗАВИСИМОСТИ ПРОЦЕССА ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ В ЛАДОЖСКОМ ОЗЕРЕ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

© 2023 г. С. Г. Каретников^{1,*}

¹ Институт озерадения РАН – СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: karetsr@gmail.com

Поступила в редакцию 19.12.2022 г.

После доработки 14.03.2023 г.

Принята к публикации 31.03.2023 г.

Приведены дистанционные данные о распределении льда на акватории Ладожского озера за последние тридцать зим. По данным метеостанции Сортавала подсчитывались накопления льда после устойчивого перехода через 0°C в сторону отрицательных значений суммы среднесуточных температур воздуха. Получена схема продвижения кромки льда при замерзании озера в зависимости от накопленной суммы среднесуточных температур воздуха.

Ключевые слова: Ладожское озеро, первичные ледовые явления, температура воздуха, глубины озера

DOI: 10.31857/S2076673423020096, **EDN:** RUOZBJ

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения за пространственным распределением ледяного покрова на Ладожском озере методами ДЗЗ ведутся начиная с 1943 г., когда для обеспечения “Дороги жизни” понадобились сведения о замерзании и вскрытии озера. До 1996 г. регулярные облёты и ледовые авиаразведки проводило Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Результаты этих обследований публиковались и рассылались заинтересованным организациям в виде картосхем пространственного распределения льда с учётом его сплочённости. Позже на смену данным, по результатам ледовых авиаразведок, пришли спутниковые данные, которые вплоть до настоящего времени остаются основными для анализа пространственного распределения льда.

Подобные работы проводились на Онежском озере, где было рассмотрено, как процесс становления льда и его разрушения зависит от предшествующих этим процессам температур воздуха и их сумм (Баклагин, 2019). На Великих Американских озерах, которые замерзают не полностью, рассмотрена зависимость степени максимального распространения льда за зиму от сумм отрицательных температур воздуха и глубины водоемов (Assel et al., 2003).

На образование и разрушение льда на озере в наибольшей степени влияет баланс суммарного тепла на поверхности воды. Эта математическая задача наиболее полно рассмотрена в программе

FLAKE (Kirillin et al., 2011). Для Ладожского озера эта программа была применена (Голосов и др., 2021) с использованием метеоданных реанализа, четыре узла которого окружают акваторию озера. При сравнении данных расчета полного теплового потока с более простыми получаемыми показателями, накопленной суммой среднесуточных температур воздуха, взятых на ближайшей метеостанции, при оценке снеготаяния на ледниках немецких Альп (Ismail et al., 2023) была обнаружена их взаимозаменяемость.

Цель работы – построение типичной для Ладожского озера схемы пространственного распределения необходимых для появления первичных ледовых явлений сумм накопления среднесуточных температур воздуха с учётом глубины озера.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе для фиксации ледовой обстановки на Ладожском озере применены обработанные автором ранее картосхемы авиационных снимков и информации со спутников серии MODIS (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). Для лучшей визуализации ледовых явлений применялся композиционный снимок 7-го (2.105–2.155 мкм), 2-го (0.841–0.876 мкм) и 1-го (0.620–0.670 мкм) каналов с пространственным разрешением в видимом участке спектра 250 м. Для дополнительной интерпретации использовались данные со спутников серии NOAA с аппаратурой AVHRR с пространственным разрешением около 1 км как в видимом

диапазоне (0.725–1.00 мкм), так и обработанные по программе ИКИ (Захаров и др., 1993) данные тепловых каналов (10.30–11.30 и 11.5–12.50 мкм). Данные о состоянии подстилающей поверхности с этих спутников доступны только в ясные дни. При длительном отсутствии безоблачных дней учитывалась информация со спутника Sentinel-1 (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/>) с пространственным разрешением в радиодиапазоне SAR 100 м. Географическую трансформацию и привязку данных спутникового зондирования, их математическую обработку выполняли в программе SeaDAS 1.4. Все картосхемы ледовых авиационных обследований были оцифрованы в закреплённой на местности сетке с ячейкой 10×10 км с учётом сплоченности льда, указанной на картосхеме. В каждой из 180 ячеек на дату съёмки визуально указывалась балльность степени покрытия льдом с точностью 10%. Спутниковые данные, продолжившие ряд ледовых авиаразведок, обрабатывались по той же методике. Для анализа в статье было использовано 700 ледовых съёмок для периода становления ледостава дистанционными методами за последние тридцать зим (с 1992 по 2022 г.). Построенная таким образом электронная таблица позволила автору получить типичные схемы пространственного распределения льда при замерзании и его разрушении (Karetnikov, 2010, 2015), а также оценить изменения в этой типичной схеме, произошедшие за последние 55 лет (Karetnikov, 2021).

Для каждой из 180 ячеек рассчитывалась средняя её глубина по электронной модели дна Ладожского озера (Науменко, 1995). Процесс ледообразования на Ладожском озере начинается у берегов в мелководных южных губах. Далее ледяной покров распространяется в глубоководные районы озера, расположенные в северной его части. Граница между ледяным покровом различной сплоченности и свободной ото льда водой называется кромкой льда (Бушуев и др., 1974). Место в озере первого появления льда соответствует кромке льда на дату съёмки. Из электронной таблицы для каждой из 180 ячеек выбиралась дата, когда в каждую из тридцати зим фиксировалась первое появление льда с соответствующей накопленной к этой дате суммой среднесуточных температур воздуха.

При наблюдениях за динамикой ледовитости озера было обнаружено, что во время оттепелей, уменьшающих абсолютную величину суммы накопления отрицательных температур, уменьшается и площадь покрытия озера льдом. Поэтому вместо сумм накопления отрицательных среднесуточных температур воздуха для характеристики изменений ледовых условий предлагается в сумме накопления учитывать знак среднесуточной температуры воздуха после устойчивого перехода через 0°C в сторону отрицательных значений.

Суммы накопления среднесуточных значений температур воздуха рассчитывались по данным метеостанции Сортавала, единственной для района Ладожского озера, метеоданные которой находятся в открытом доступе (<http://aisori-m.meteo.ru/waisori/select.xhtml>). Подсчёт сумм начинался с даты устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°C в сторону отрицательных значений осенью. За дату устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C в сторону отрицательных значений осенью принимается первый день периода, когда сумма отрицательных среднесуточных значений температуры воздуха по абсолютной величине превышает сумму положительных среднесуточных значений в последующий оттепельный период. Рассчитанные на даты ледовых съёмок таким простым способом накопленные суммы предлагается использовать в качестве характеристики результирующего теплового потока. На основе осредненных за тридцать зим сумм среднесуточных температур воздуха, накопленных на дату первого появления льда в каждой ячейке, была построена схема, приведенная на рис. 1. Интерполяция между закреплёнными на местности ячейками производилась методом Крайджинга с шагом 5 км в программе SURFER-11.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При достижении суммы накопления температур воздуха $\sum T_{\text{возд}} = -50^{\circ}\text{C}$ первый лёд появляется в южных мелководных губах Ладожского озера. По мере дальнейшего накопления сумм среднесуточных температур воздуха происходит закономерное появление ледовых явлений в глубоководной северной части озера. Из такой схемы следует, что должна существовать зависимость между суммой накопленных среднесуточных температур воздуха, необходимой для образования первичных ледовых явлений, и местом на озере, определяемым его глубиной. Представленная на рис. 2 корреляционная зависимость отображает общую тенденцию – с увеличением глубины увеличивается сумма накопления температур воздуха, необходимая для появления первичных ледовых явлений. По накопленной на определенную дату сумме среднесуточных температур воздуха, которую легко подсчитать, и используя статистически значимую (с уровнем значимости 0.05) зависимость, можно оценочно получить место в озере в зависимости от глубины, где будет находиться кромка льда

$$H = -0.27 \sum T_{\text{возд}} - 14.62,$$

где H – глубина, над которой происходит образование первичных ледовых явлений, м; $\sum T_{\text{возд}}$ – накопленная на определенную дату сумма сред-

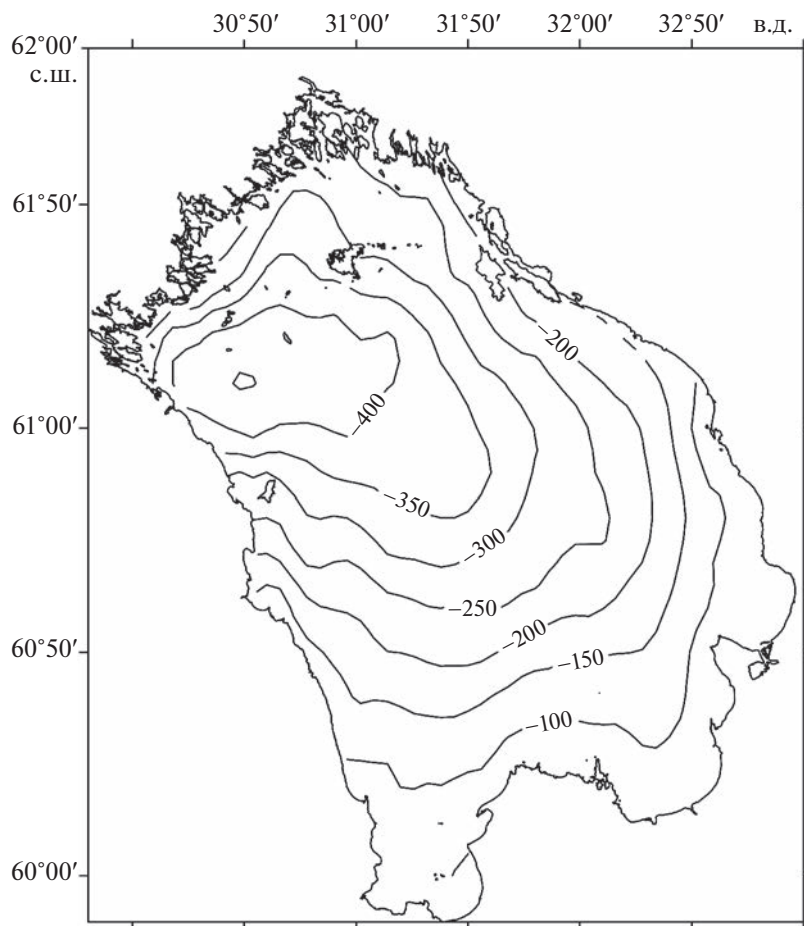


Рис. 1. Схема необходимой суммы среднесуточной температуры воздуха для образования первичных ледовых явлений на акватории Ладожского озера.

Fig. 1. The scheme of accumulated sum of the average daily air temperature required for the formation of primary ice phenomena on the Lake Ladoga water area.

несуточных температур воздуха, требуемая для появления льда, °С.

Предлагаемая зависимость описывает 3/4 случаев; оставшиеся 1/4 случаев можно объяснить ветровым переносом, который происходит без какой-либо закономерности, а чисто случайно, особенно в глубоководных частях озера. Аналогичное исследование было проведено на озёрах Финляндии (Korhonen, 2019), для которых определено минимальное количество градусо-дней, необходимое для образования ледостава. В Финляндии ледостав на мелких озёрах начинался сразу после перехода среднесуточных температур воздуха через 0°С в сторону отрицательных значений. На озёрах с глубиной 25 м ледостав наблюдается при достижении $\sum T_{\text{возд.}} = -200^\circ\text{C}$.

Осреднённые за тридцать зим даты появления первичных форм льда в каждой закреплённой на местности ячейке, которые были получены в процессе настоящего исследования, сравнивались с

имеющимися датами ледостава в тех же ячейках для периода после 1963 г. (Karetnikov, 2021). Вдоль берегов период от начала ледообразования до установления ледостава длится около 55 сут; чем дальше от берега, тем короче этот период, он сокращается до 45 сут. На большей части акватории озера в последние годы ледостава не образуется, хотя и отмечаются первичные формы ледовых явлений.

ВЫВОДЫ

На основе оцифрованных данных о пространственном распределении льда на Ладожском озере за 30-летний период удалось построить типичную схему продвижения в озере ледовой кромки в зависимости от накопления суммы среднесуточных температур воздуха. Период от начала ледообразования до установления ледостава колеблется от двух месяцев у берегов до полутора месяцев в открытой части озера. Предположительно

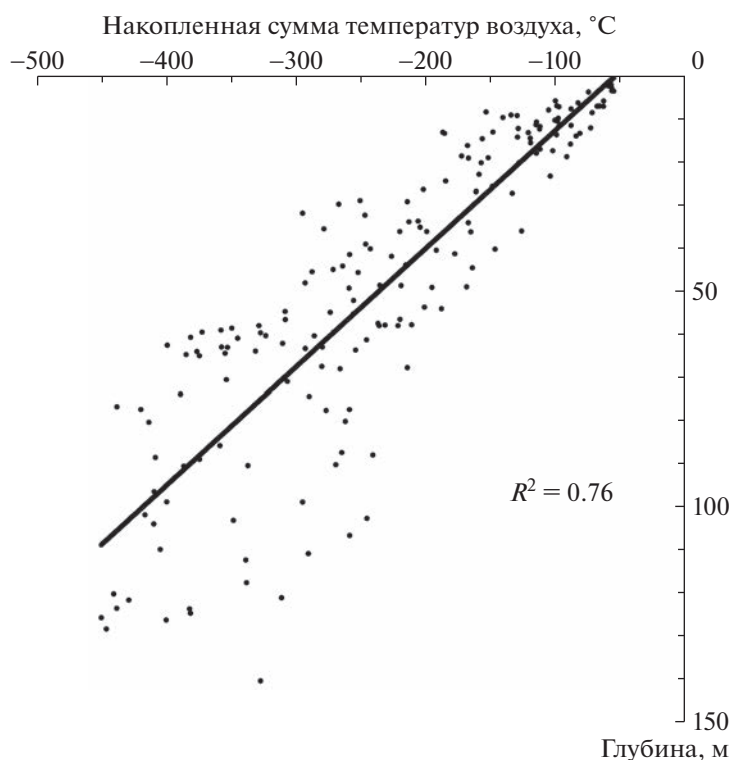


Рис. 2. Зависимость глубины места появления первичных ледовых явлений от накопленной суммы среднесуточных температур воздуха.

Fig. 2. Dependence of the depth of location of primary ice phenomena appearance on the accumulated sum of average daily air temperatures.

статистически значимая зависимость толщины водного слоя, над которым образуются первые ледовые явления, от сумм накопления среднесуточных температур воздуха позволит оценивать пространственное распределение льда на акваториях других озер.

Благодарности. Работа выполнена по теме плана НИР ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН на 2019–2023 гг. № FMNG-2019-0001 “Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов”.

Acknowledgments. The work was carried out according to the research plan of Institute of Limnology RAS for 2019–2023 № FMNG-2019-0001 “Integrated assessment of Lake Ladoga ecosystem dynamics and its watershed under the influence of natural and anthropogenic factors”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баклагин В.Н. Влияние метеорологических условий на формирование ледового режима Онежского озера // Лёд и Снег. 2019. Т. 59. № 4. С. 546–556. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-413>
- Бушуйев А.В., Волков Н.А., Лощилев В.С. Атлас ледовых образований. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 138 с.

Голосов С.Д., Зверев И.С., Шипунова Е.А. Моделирование термодинамических процессов и экосистем Ладожского и Онежского озер на основе 3D-модели гидродинамики внутреннего моря // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Ред. С.А. Кондратьев, Ш.Р. Поздняков, В.А. Румянцев. М.: Изд-во РАН, 2021. С. 493–501.

Захаров М.Ю., Лупян Е.А., Мазуров А.А. Программа обработки данных прибора AVHRR спутников серии NOAA для персональных компьютеров // Исследование Земли из космоса. 1993. № 4. С. 62–68.

Каретников С.Г. Опыт создания схем замерзания и вскрытия Ладожского озера. // Научное обеспечение реализации “Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года”. Т. 1. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 433–439.

Наumenko М.А. Новое определение морфометрических характеристик Ладожского озера // Доклады РАН. 1995. Т. 345. № 4. С. 514–517.

NASA's OceanColor Web // Электронный ресурс. <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/> (Дата обращения: 19.12.2022)

Copernicus Open Access Hub // Электронный ресурс. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/> (Дата обращения: 19.12.2022)

- Специализированные массивы для климатических исследований ВНИГМИ МЦД // Электронный ресурс. <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/select.xhtml> (Дата обращения: 19.12.2022)
- Assel R., Cronk K., Norton D. Recent trends in Laurentian Great Lakes ice cover // *Climatic Change*. 2003. V. 57. № 1–2. P. 185–204.
- Ismail M.F., Bogacki W., Disse M., Schäfer M., Kirschbauer L. Estimating degree-day factors of snow based on energy flux components // *The Cryosphere*. 2023. № 17. P. 211–231.
<https://doi.org/10.5194/tc-17-211>
- Karetnikov S.G. Lake Ladoga Freezing and Break-up Analysis // The 20th IAHR International Symposium on ice/ 14–17 June 2010, Lahti, Finland. 2010 V. 1. P. 182–189.
- Karetnikov S.G. Manifestation of climatic change in the ice phenology of Lake Ladoga over the past 55 years. // *Ice and Snow*. 2021. V. 61. № 2. P. 241–247.
<https://doi.org/10.31857/S2076673421020085>
- Kirillin G., Nützmann G., Hochschild J., Mironov D., Terzhievik A., Golosov S. FLake-GLOBAL: Online lake model with worldwide coverage // *Environmental Modelling & Software*. 2011. V. 26. № 5. P. 683–684.
- Korhonen J. Long-term changes and variability of the winter and spring season hydrological regime in Finland // University of Helsinki. Report series in Geophysics № 79. 2019. 82 p.

Citation: Karetnikov S.G. On the dependence of the ice formation in the Lake Ladoga on the air temperature. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (2): 296–301. [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423020096

On the Dependence of the ice Formation in the Lake Ladoga on the Air Temperature

S. G. Karetnikov^{a, #}

^a Institute of Limnology RAS, St. Petersburg, Russia

[#]e-mail: karetsr@gmail.com

The purpose of the work was to establish regularities of the ice formation in the largest European Lake Ladoga depending on the air temperature. The average daily air temperatures obtained at the Sortavala weather station for thirty years were used for the analysis. The main task was to determine the sums of accumulated average daily air temperatures necessary for the appearance of primary ice phenomena in areas with different depths of the Lake. To solve this problem digitized remote sensing data of the spatial distribution of ice in the fixed cells with known average depth and data on average daily air temperatures were used. For thirty last winters, the dates of the first ice appearance in each of 180 cells were selected, which were related to the accumulated to this date sum of mean daily air temperatures after its steady transition through 0°C towards the negative values. The resulting scheme of the accumulated sums of air temperatures needed for the ice appearance indicates their regular growth with increasing depth. It is assumed that this dependence will make it possible to assess dynamics of ice formation on other lakes.

Keywords: Lake Ladoga, Primary ice phenomena, air temperature, Lake depths

REFERENCES

- Baklagin V.N. Influence of meteorological conditions on the formation of the ice regime at the Lake Onego. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019, 59 (4): 546–556 [In Russian].
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-413>
- Bushuyev A.V., Volkov N.A., Loschilov V.S. *Atlas ledovy'kh obrazovaniy*. Atlas of ice formations. Leningrad: Hidrometeoizdat, 1974: 138 p. [In Russian].
- Golosov S.D., Zverev I.S., Shipunova E.A. Simulation of thermodynamic processes and ecosystems of Ladoga and Onega Lakes based on 3D model of inland sea hydrodynamics. *V knige: Sovremennoe sostoyanie i problemy antropogennoy transformatsii ekosistemy Ladozhskogo ozera v usloviyah izmenyayushchegosya klimata*. Current state and problems of anthropogenic transformation of the Lake Ladoga ecosystem under conditions of changing climate. Moscow, RAS. 2021: 493–501 [In Russian].
- Zaharov M.Yu., Lupyay E.A., Mazurov A.A. Program for NOAA AVHRR data processing using personal computers. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*. 1993, 4: 62–68 [In Russian].
- Karetnikov S.G. Experience in creating Lake Ladoga ice freezing and opening schemes. In the proceedings: Scientific support for the implementation of the “Water strategy of the Russian Federation for the period until 2020”. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the RAS. 2015: 433–439 [In Russian].
- Naumenko M.A. The new definition of Lake Ladoga morphometric characteristics. *Doklady Akademii Nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 1995, 345 (4): 514–517 [In Russian].

- NASA's OceanColor Web* Retrieved from: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/> (Last access: 19 December 2022)
- Copernicus Open Access Hub*. Retrieved from: <https://sci-hub.copernicus.eu/dhus/> (Last access: 19 December 2022)
- Specializirovannye massivy dlya klimaticheskikh issledovanij VNIIGMI MCD*. Specialized arrays for climate research VNIIGMI MCD. Retrieved from: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/select.xhtml/> (Last access: 19 December 2022) [In Russian].
- Assel R., Cronk K., Norton D.* Recent trends in Laurentian Great Lakes ice cover. *Climatic Change*. 2003, 57 (1–2): 185–204.
- Ismail M.F., Bogacki W., Disse M., Schäfer M., Kirschbauer L.* Estimating degree-day factors of snow based on energy flux components. *The Cryosphere*. 2023, 17: 211–231.
<https://doi.org/10.5194/tc-17-211>
- Karetnikov S.G.* Lake Ladoga Freezing and Break-up Analysis. The 20th IAHR International Symposium On Ice. 14–17 June 2010, Lahti, Finland. 2010, 1: 182–189.
- Karetnikov S.G.* Manifestation of climatic change in the ice phenology of Lake Ladoga over the past 55 years. *Led i Sneg*. Ice and snow. 2021, 61 (2): 241–247.
<https://doi.org/10.31857/S2076673421020085>
- Kirillin G., Nützmänn G., Hochschild J., Mironov D., Terzhhevik A., Golosov S.* FLake-GLOBAL: Online lake model with worldwide coverage. *Environmental Modelling & Software*. 2011, 26 (5): 683–684.
- Korhonen J.* Long-term changes and variability of the winter and spring season hydrological regime in Finland. University of Helsinki. Report series in Geophysics № 79. 2019: 82.