

## СТАТЬИ

УДК 556(268.46)

**ЗАВИСИМОСТИ ХАРАКТЕРНЫХ ДАТ ЛЕДОВОГО РЕЖИМА БЕЛОГО МОРЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФОНА НАД ЕГО АКВАТОРИЕЙ****Баклагин В.Н.**

*Институт водных проблем Севера – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук», Петрозаводск, e-mail: slava.baklagin@mail.ru*

Особенности формирования ледового режима на Белом море оказывают существенное влияние на социально-экономическую деятельность региона. Это связано прежде всего с тем, что в акватории Белого моря проложено большое количество судоходных путей, по которым проходит транспортировка товаров промышленного назначения. Знания о протекании ледового режима, сроках формирования и разрушения ледяного покрова на Белом море необходимы для организации и осуществления планирования в навигационный период. В работе проведено исследование, направленное на уточнение и актуализацию ранее полученных сведений о формировании ледового режима Белого моря, а также установлены регрессионные зависимости, определяющие сроки формирования ледового режима (даты начала формирования ледовых явлений и полного очищения акватории моря ото льда). При этом использованы современные методы получения данных о ледовой ситуации на море, которые включают в себя применение данных дистанционного зондирования земли, в частности ежедневные данные спутниковых наблюдений, обладающих высоким пространственно-временным разрешением. Анализ спутниковых данных показал, что средняя продолжительность ледового режима на Белом море составляет 153 дня, максимально – 178 дней, минимально – 128 дней. В среднем формирование ледовых образований в акватории моря начинается при достижении сумм накопления отрицательных температур воздуха над акваторией моря  $-113^{\circ}\text{C}$ , а полное очищения моря ото льда – при достижении сумм накопления положительных температур воздуха над акваторией моря  $+61^{\circ}\text{C}$ . На основании ежедневных рядов о температуре воздуха в пунктах на побережье Белого моря получены регрессионные зависимости для определения характерных дат ледового режима Белого моря, которые могут быть использованы для решения научно-практических задач, связанных с организацией и планированием навигационного периода на море.

**Ключевые слова:** Белое море, ледовый режим, характерные даты, ледовитость, температура воздуха

**VARIATIONS OF INDICATIVE DATES OF THE ICE REGIME ON THE WHITE SEA BY THE TEMPERATURE ABOVE ITS SURFACE****Baklagin V.N.**

*Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, e-mail: slava.baklagin@mail.ru*

Features formation of the ice regime on the White Sea has a significant impact on the socio-economic activity of the region. This is primarily because a large number of shipping routes have been laid on the White Sea, along which industrial goods are transported. Knowledge about the features formation of the ice regime, the timing of the formation and destruction of the ice cover on the White Sea are necessary for planning and organizing the navigation period. The study conducted a study aimed at clarifying and updating the previously obtained information on the formation of the ice regime on the White Sea, and also established regression dependencies that determine the timing of the formation of the ice regime. At the same time, modern methods of obtaining data on the ice situation at sea were used, which include the use of remote sensing data, in particular, daily satellite observation data with high spatial-temporal resolution. On average, the formation of ice formations in the sea begins when the accumulation of air temperatures above the sea reaches  $-113^{\circ}\text{C}$ , and complete cleansing of the sea from ice at  $61^{\circ}\text{C}$ . Based on the daily series of air temperature in points on the White Sea coast, regression dependencies were obtained to determine the indicative dates of the ice regime on the White Sea, which can be used to solve scientific and practical problems related to the organization and planning of the navigation period at sea.

**Keywords:** White Sea, ice regime, indicative dates, ice coverage, air temperature

Формирование ледяного покрова в акватории многих морей Северного полушария является неотъемлемой частью гидрологического цикла. Сведения о формировании ледового режима необходимы для планирования и организации водного транспорта в навигационный период, а также возможности транспортировки людей и/или грузов по установившемуся льду [1; 2]. Это особенно важно для тех морей, по которым осуществляются морские грузоперевозки, имеющие не только коммерческое, но и хозяйственное значение.

Белое море – это внутреннее море, расположенное на севере европейской части России, оно относится к Северному Ледовитому океану. Площадь его акватории составляет 90 тыс. км<sup>2</sup>, наибольшая глубина составляет 343 м. Также Белое море сообщается с обширным Баренцевым морем, что оказывает влияние на протекание ледовых процессов на Белом море благодаря смягчению климатических условий [3]. Необходимо отметить, что ежегодно поверхность акватории Белого моря в зимнее время практически полностью покрывается

льдом, а весной море полностью освобождается ото льда. Значение морских перевозок по акватории Белого моря трудно переоценить. Через Белое море проходит масса судоходных путей, которые связывают города России, расположенные в северной ее части, с центральными областями России. Наиболее крупным портом является Архангельск, откуда проложены пути в другие порты, находящиеся на побережье Белого моря – Мезень, Северодвинск, Беломорск и другие. Например, доставка товаров по Белому морю в Кандалакшу жизненно необходима для градообразующего предприятия города. Также одним из важнейших портов является Беломорск, который связан с центральными областями России благодаря Беломорско-Балтийскому каналу.

Для организации логистики перевозок по Белому морю необходимо располагать сведениями о ледовой ситуации на море, закономерностях происходящих ледовых явлений, среднестатистических сроках формирования и разрушения ледовых образований. Следует отметить, что подобные исследования Белого моря были проведены ранее. Первые систематические наблюдения за состоянием ледяного покрова у берегов Белого моря были начаты маячной службой Российского Морского ведомства на маяках (1894–1898 гг.). В период 1918–1985 гг. систематические ледовые наблюдения проводились на 30 прибрежных станциях. Также с 1909 г. наблюдения за ледяным покровом осуществлялись с ледоколов и зверобойных судов. А с 1927 г. предпринимались авиационные вылеты для проводки судов через льды. Наиболее полные сведения о протекании ледовых процессов на Белом море собраны в трудах, предоставленных государственным Океанографическим институтом СССР [3], где представлены различные статистические характеристики, описывающие происходящие на Белом море ледовые явления по материалам авиаразведок, судовых наблюдений, производимых на береговых станциях и постах за период вплоть до 1985 года. Все эти материалы представляют большой научный и практический интерес, однако следует отметить, что, как отмечается многими исследователями [4; 5], в последние десятилетия по всему миру происходят существенные изменения климатических условий, связанные с глобальным потеплением, что приводит к изменению протекания ледовых процессов на озерах и морях, в связи с чем полученные ранее данные необходимо актуализировать с учетом сложившихся нетипичных клима-

тических условий за последние десятилетия в данном регионе. Кроме того, необходимо отметить, что современные методы наблюдения за состоянием ледяного покрова озер и морей включают использование спутниковой съемки [6; 7], которая в полной мере не была доступна исследователям XX века. Данные спутниковых наблюдений позволяют существенно расширить и уточнить знания и сведения о протекании ледового режима на многих водоемах, в том числе и Белом море, поскольку обладают высоким пространственным и временным разрешением, что немаловажно для оценки динамики изменений ледовых образований.

Цель исследования: установление закономерностей характерных дат ледового режима на Белом море в зависимости от температурного фона над его акваторией, а также уточнение и актуализация статистических характеристик ледового режима по данным спутниковых наблюдений за период последних лет (2004–2020 гг.).

#### Материалы и методы исследования

Для анализа и оценки протекания ледового режима на Белом море в данном исследовании использованы наборы спутниковых данных за период 2004–2020 гг., предоставленные Национальной воздухоплавательной и космической администрацией США NASA (датчик MODIS, с пространственным разрешением до 250 м), Национальным центром данных по снегу и льду NSIDC (4–6 км), Центром спутниковых приложений и исследований NOAA NESDIS (4–6 км). Для комплексной оценки изменения ледовитости в ледовый период в данном исследовании рассчитаны суммы суточных значений ледовитости за каждый период ледовых явлений ( $\sum ice$ ) по формуле, приведенной в работе [6].

Ежедневные данные о среднесуточной температуре воздуха за период 2003–2020 гг., полученные в метеорологических пунктах наблюдений (с индексом ВМО): г. Кандалакша (222170), п. Каневка (222490), п. Шойна (22710), п. Ковда (223120), п. Умба (223240), с. Кашкаранцы (223340), с. Пялица (223490), Абрамовский маяк (223650), п. Соловецкий (2240290), остров Жижгин (224380), Зимнегорский маяк (224480), г. Мезень (224710), пристань Кемь (225200), д. Растьнаволоок (225250), с. Колежма (225290), Унский маяк (225410), г. Северодвинск (225460), аэропорт (Талаги) Архангельск (225500), г. Онега (226410) – предоставлены Национальным

центром климатических данных NOAA США (NCDC NOAA) [8]. Оценка метеорологический условий над акваторией Белого моря осуществлялась осреднением данных о температуре воздуха, полученных в пересчитанных выше пунктах.

**Результаты исследования и их обсуждение**

Анализ спутниковых данных о ледовой ситуации на акватории Белого моря за период 2004-2020 гг. (рис. 1) показал, что акватория Белого моря ежегодно почти полностью покрывается льдом, однако из-за наличия трещин и высокой подвижности ледовых образований (дрейфом), связанных с наличием сильных ветровых явлений над акваторией Белого моря, значение ледовитости никогда не достигает 100%.

Средняя продолжительность ледового режима на Белом море ( $L$ , дни) составляет 153 дня, максимально – 178 дней, минимально – 128 дней в период 2004–2020 гг.

Характерные даты ледового режима на Белом море: дата формирования ледовых образований и дата полного освобождения акватории моря ото льда в среднем за период 2004-2020 гг. выпадают на 6 декабря и 8 мая соответственно (рис. 2).

Посредством регрессионного анализа удалось установить закономерности наступления характерных дат ледового периода Белого моря, исходя из среднемесячных температур воздуха, предшествующих искомым датам периодов. Дата начала формирования ледяного покрова на Белом море  $D_{freezing}$  определяется зависимостью (коэффициент детерминации – 0.43):

$$D_{freezing} = 0.0634 \cdot \bar{T}_{XII}^2 - 0.4427 \cdot \bar{T}_{XI}^2 - 1.3208 \cdot \bar{T}_X^2 + 2.0259 \cdot \bar{T}_{IX}^2 - 0.3438 \cdot \bar{T}_{XII} + 3.3986 \cdot \bar{T}_{XI} - 4.1200 \cdot \bar{T}_X - 30.125 \cdot \bar{T}_{IX} + 145.336,$$

где  $D_{freezing}$  – продолжительность периода с 1 ноября до начала формирования ледовых образований, дни;  $\bar{T}_i$  – средняя температура воздуха над акваторией озера в  $i$ -й месяц, °С.

Соответственно дата полного очищения акватории моря ото льда  $D_{free}$  определяется зависимостью (коэффициент детерминации – 0.74):

$$D_{free} = -0.4454 \cdot \bar{T}_V^2 + 2.1126 \cdot \bar{T}_{IV}^2 - 0.06176 \cdot \bar{T}_{III}^2 + 4.1715 \cdot \bar{T}_V + 0.5959 \cdot \bar{T}_{IV} - 3.4410 \cdot \bar{T}_{III} + 9.0817,$$

где  $D_{free}$  – продолжительность периода с 1 апреля до наступления полного очищения моря ото льда, дни.

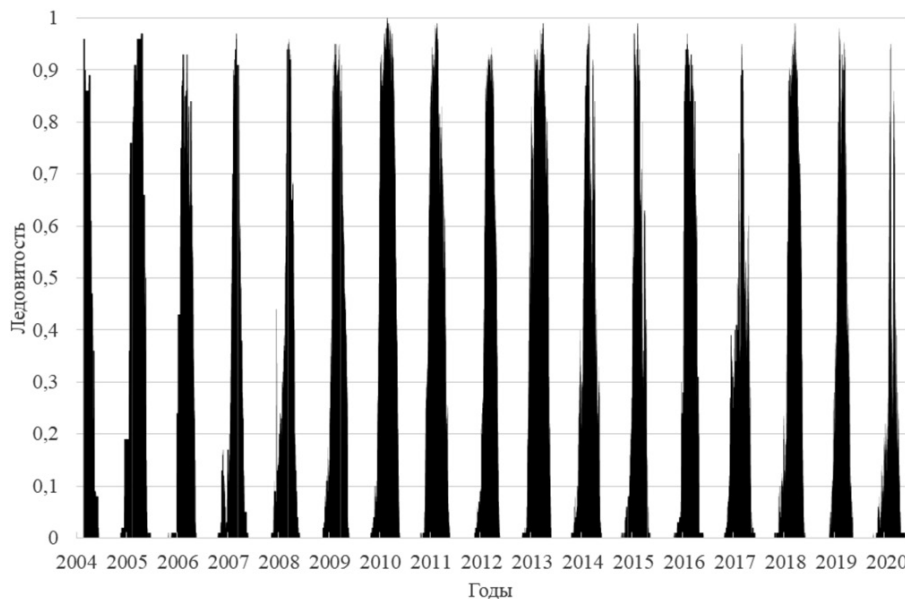


Рис. 1. Фактические значения ледовитости Белого моря за период 2004–2020 гг.

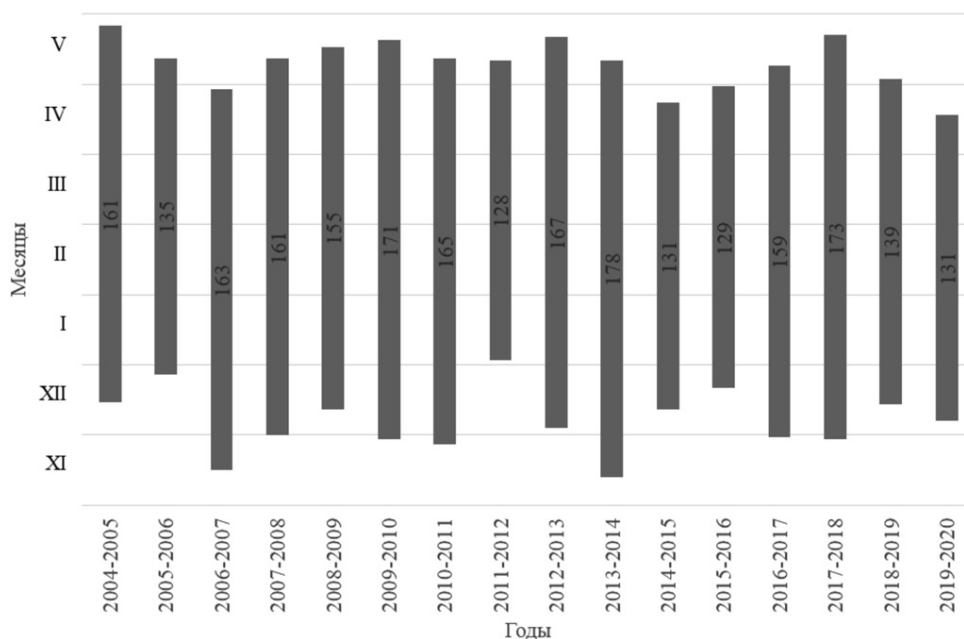


Рис. 2. Характерные даты и продолжительности ледового периода Белого моря за 2004–2020 гг.

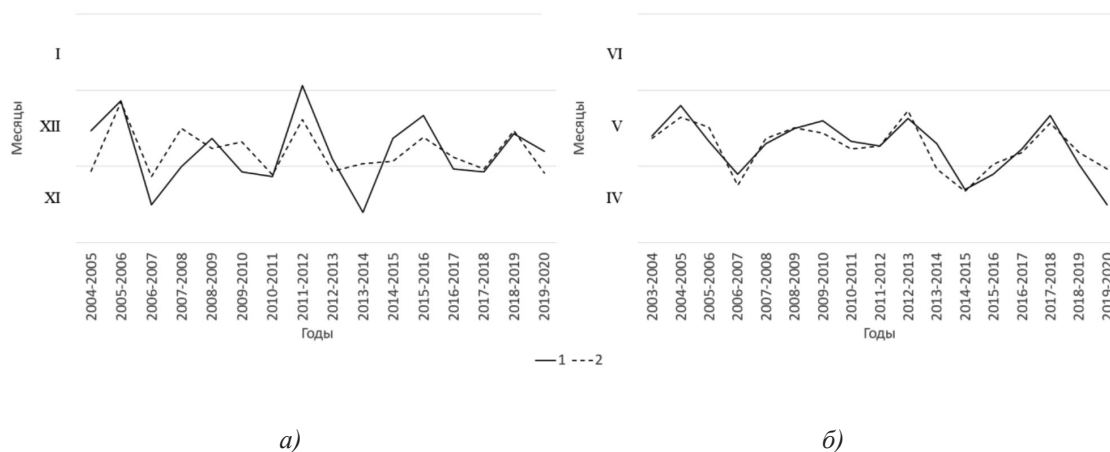


Рис. 3. Фактические (1) и расчетные (2) характерные даты ледового режима Белого моря: а) начало формирования ледовых образований; б) полное освобождение акватории моря от льда

Сравнительный анализ полученных регрессионных уравнений показал (рис. 3), что средняя ошибка при расчете дат начала формирования ледяного покрова составляет 8.0 дней, а при расчете дат полного освобождения моря от льда – 3.9 дня.

Коэффициент парной корреляции между величинами  $L$  и среднегодовой температурой воздуха над акваторией Белого моря ( $\bar{T}$ , °C) составляет  $-0.41$ , что указывает на умеренную силу связи (по шкале Чеддока) между этими характеристиками. Сле-

дует отметить, что в значительной степени большее влияние на формирование ледового режима оказывают температуры воздуха в зимний период. Так, среднее значение сумм накопления отрицательных температур воздуха над акваторией Белого моря  $\sum T_{-\max}$  за период 2004–2020 гг. составляет  $-1046$  °C, а коэффициент парной корреляции между величинами  $\sum ice$  и  $\sum T_{-\max}$  составляет  $-0.84$ , что указывает на высокую силу связи между этими характеристиками.

Анализ сумм накопления температур воздуха над акваторией Белого моря за периоды, включающие характерные даты ледового режима, показал, что в среднем начало формирования ледяного покрова на Белом море происходит при достижении сумм накопления отрицательных температур воздуха над акваторией моря ( $\sum T_{freezing}$ , °C) значения  $-113$  °C, а освобождение ото льда ( $\sum T_{free}$ , °C) – при достижении значения  $+61$  °C. Однако эти значения являются осредненными при высоких коэффициентах вариации соответствующих статистических рядов – 55% и 80% соответственно.

В результате исследования было установлено, что  $\sum T_{free}$  имеет тесную корреляционную связь (коэффициент парной корреляции  $-0.78$ ) с величиной  $\sum T_{-max}$ , что свидетельствует о том, что сумма накопления положительных температур воздуха, необходимых для полного очищения акватории Белого моря ото льда, зависит от суммы отрицательных температур за предшествующий вскрытию холодный сезон. Это факт может объясняться тем, что большее значение толщины ледяного покрова, который образуется за холодный сезон, препятствует быстрому освобождению акватории моря ото льда и требует большего количества положительных температур воздуха; также справедлива и противоположная ситуация. Следует также отметить, что корреляционный анализ показал, что между суммами накопления положительных температур воздуха за теплый сезон  $\sum T_{+max}$  и суммами накопления положительных температур воздуха на начало формирования ледяного покрова  $\sum T_{freezing}$  корреляционная связь не наблюдается (коэффициент парной корреляции  $0.01$ ). Подобная ситуация наблюдается и для Онежского озера, как было показано в работе [9]. В результате корреляционного анализа было также установлено, что наилучшая статистическая связь наблюдается между величинами  $\sum T_{freezing}$  и  $\sum T_{60}$  (сумма накопления положительных температур воздуха над акваторией Белого моря за последние 60 дней перед началом холодного сезона), коэффициент парной корреляции составляет  $-0.3$ . Следует отметить, что коэффициент парной корреляции между данными величинами составляет  $-0.33$  и для Онежского озера, что показано при исследовании зависимостей формирования ледового режима Онежского озера в зависимости от метеорологических факторов [9]. Это свидетельствует о том, что на формирование ледяных образований

большое влияние оказывают другие метеорологические факторы, не связанные с температурой воздуха, например скорость и направление ветра.

Регрессионный анализ позволил выявить уравнения, связывающие величины  $\sum T_{free}$  и  $\sum T_{-max}$  (коэффициент детерминации  $0.61$ ),  $\sum T_{freezing}$  и  $\sum T_{60}$ :

$$\sum T_{free} = -0.160 \cdot \sum T_{-max} - 106.034,$$

$$\sum T_{freezing} = -0.675 \cdot \sum T_{60} - 80.130.$$

Данные уравнения потенциально могут иметь весьма широкое практическое применение, поскольку в совокупности с данными об ожидаемых температурах воздуха возможно осуществлять ориентировочный прогноз дат формирования и разрушения ледяного покрова на Белом море.

### Заключение

В работе уточнены характерные даты ледового режима Белого моря, а также получены регрессионные зависимости определения характерных дат ледового режима, исходя из среднемесячных температур воздуха, таких как начало формирования ледовых явлений и полного очищения моря ото льда. Также установлены значения сумм накопления температур воздуха, необходимых для наступления характерных ледовых явлений на Белом море, и выявлены закономерности между этими значениями. Результаты этого исследования существенно расширяют и актуализируют знания о формировании ледового режима на Белом море и могут использоваться для решения научно-практических задач при планировании навигационного периода.

*Работа выполнена в рамках темы госзадания «Закономерности изменений экосистем Белого моря при интенсификации освоения Арктической зоны региона и под влиянием изменений климата», № АААА-А18-118032290034-5.*

### Список литературы / References

1. Сало Ю.А., Назарова Л.Е. Многолетняя изменчивость ледового режима Онежского озера в условиях нестационарности регионального климата // Известия русского географического общества. 2011. Т. 143. № 3. С. 50–55.
2. Salo Yu.A., Nazarov L.E. Multiannual variability of the Omega Lake ice regime in conditions of variability of the regional climate // Izvestiya Russkogo Geograficheskogo Obshchestva. 2011. Vol. 143. № 3. P. 50–55 (in Russian).
3. Karetnikov S., Naumenko M. Lake Ladoga ice phenology: Mean condition and extremes during the last 65 years. Hy-

- drological processes. 2011. vol. 25. no. 18. P. 2859–2867. DOI: 10.1002/hyp.8048.
3. Глуховский Б.Х. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Белое море. Ленинград: Гидрометеоздат, 1991. 240 с.
- Glukhovskiy B.H. Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. White Sea. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991. 240 p. (in Russian).
4. Brown L.C., Duguay C.R. The response and role of ice cover in lake-climate interactions. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. 2010. vol. 34. no. 5. P. 671–704. DOI: 10.1177/0309133310375653.
5. Efremova T.V., Palshin N.E., Zdorovenov R.E. Long-term characteristics of ice phenology in Karelian lakes. *Estonian Journal of Earth Sciences*. 2013. vol. 62. no. 1. P. 33–41. DOI: 10.3176/earth.2013.04.
6. Баклагин В.Н. Изменчивость ледовитости Онежского озера в период 2000–2018 гг. по спутниковым данным // Лёд и Снег. 2018. Т. 58 № 4. С. 552–558. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-4-552-558.
- Baklagin V.N. Variability of the Lake Onega ice coverage in the period 2000–2018 according to the satellite data // *Ice and Snow*. 2018. Vol. 58. № 4. P. 552–558 (in Russian).
7. Tilling R.L., Ridout A., Shepherd A. Near-real-time Arctic sea ice thickness and volume from CryoSat-2. *The Cryosphere*. 2016. vol. 10 no. 5. P. 2003–2012. DOI: 10.5194/tc-10-2003-2016.
8. National Centers for Environmental Information NOAA: Data Access. [Electronic resource]. URL: <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa/> (date of access: 15.06.2020).
9. Баклагин В.Н. Влияние метеорологических условий на формирование ледового режима Онежского озера // Лёд и Снег. 2019. Т. 59 № 4. С. 546–556. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-4-413.
- Baklagin V.N. Influence of meteorological conditions on the formation of ice regime of the Lake Onega // *Ice and Snow*. 2019. Vol. 59 № 4. P. 546–556 (in Russian).