



УДК 551.463 (268.45)

## Среда обитания водных биологических ресурсов

# Прогноз температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» на основе анализа вековой изменчивости гидрометеорологических и астрогеофизических факторов

А. Г. Трофимов

Полярный филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО») им. Н. М. Книповича, ул. Академика Книповича 6, г. Мурманск, 183038

E-mail: [trofimov@pinro.vniro.ru](mailto:trofimov@pinro.vniro.ru)

SPIN-код: 6762–9699

**Цель работы:** охарактеризовать долгопериодную изменчивость температуры атлантических вод в Баренцевом море в 1900–2023 гг. и оценить возможность её прогнозирования с помощью гидрометеорологических и астрогеофизических факторов.

**Материалы:** температура воды на разрезе «Кольский меридиан», климатические индексы (глобальный индекс приземной температуры для Северного полушария, индексы Северо-Атлантического, Северо-Тихоокеанского и Атлантического мультидекадного колебаний) и астрогеофизические параметры (солнечная активность, интенсивность солнечного излучения, координаты полюса Земли и нутация её оси вращения) за 1900–2023 гг.

**Методы:** сравнительный анализ данных, методы описательной статистики, корреляционный, регрессионный и гармонический анализы.

**Результаты:** дана характеристика межгодовых изменений температуры атлантических вод в Баренцевом море в 1900–2023 гг., интенсивный рост которой (0,37 °C за 10 лет) происходит с конца 1970-х годов. Выделены два холодных (1900–1929 и 1963–1988 гг.) и два тёплых (1930–1962 и 1989–2023 гг.) периода, современное потепление оказалось более сильным. Построены уравнения множественной линейной регрессии для прогноза температуры воды Баренцева моря с заблаговременностью 2 года и 6 лет. Для использования на практике выбрана наиболее адекватная регрессионная модель, включающая в себя зимний индекс Северо-Атлантического колебания (вклад 11%), индекс Атлантического мультидекадного колебания (28%), солнечную активность (5%) и X-координату полюса Земли (11%). Составлены экспериментальные прогнозы температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» на 2024–2029 гг., согласно которым в ближайшие годы она сохранится на высоком уровне.

**Практическая значимость:** полученные результаты позволят лучше понимать причины межгодовой изменчивости температуры воды в Баренцевом море и могут использоваться для её долгосрочного прогнозирования.

**Ключевые слова:** Баренцево море, разрез «Кольский меридиан», глобальные климатические индексы, астрогеофизические факторы, гармоники, прогнозирование температуры воды.

## Forecasting of water temperature in the Kola section based on the analysis of secular variability of hydrometeorological and astrogeophysical factors

Alexander G. Trofimov

Polar branch of VNIRO (N.M. Knipovich «PINRO»), 6, Academician Knipovich St., Murmansk, 183038, Russia

**The aim** of the paper is to characterize the long-term variability of Atlantic water temperature in the Barents Sea in 1900–2023 and to assess the possibility of its forecasting using hydrometeorological and astrogeophysical factors.

**The material** for the study was water temperature in the Kola section, climate indices (global surface temperature index for the Northern Hemisphere, indices of the North Atlantic, North Pacific and Atlantic Multidecadal oscillations) and astrogeophysical parameters (solar activity, total solar irradiance, pole coordinates and rotation axis nutation of the Earth) for 1900–2023.

**Methods** of descriptive statistics as well as comparative, correlation, regression and harmonic analyses were applied.

**Results:** The year-to-year changes in Atlantic water temperature in the Barents Sea in 1900–2023 were characterized, with an intensive increase (0.37 °C per 10 years) occurring since the late 1970s. Two cold (1900–1929, 1963–1988) and two warm (1930–1962, 1989–2023) periods were distinguished, with the modern warming being stronger. Multiple linear regression equations were constructed to forecast Barents Sea water temperature for 2 and 6 years ahead. The most adequate regression model was selected for practical use. It includes the winter North Atlantic Oscillation index (contribution of 11%), the Atlantic Multidecadal Oscillation index (28%), solar activity (5%), and the X-coordinate of the Earth's pole (11%). Experimental forecasts of water temperature in the Kola section have been compiled for 2024–2029, according to which it will remain at a high level in the coming years.

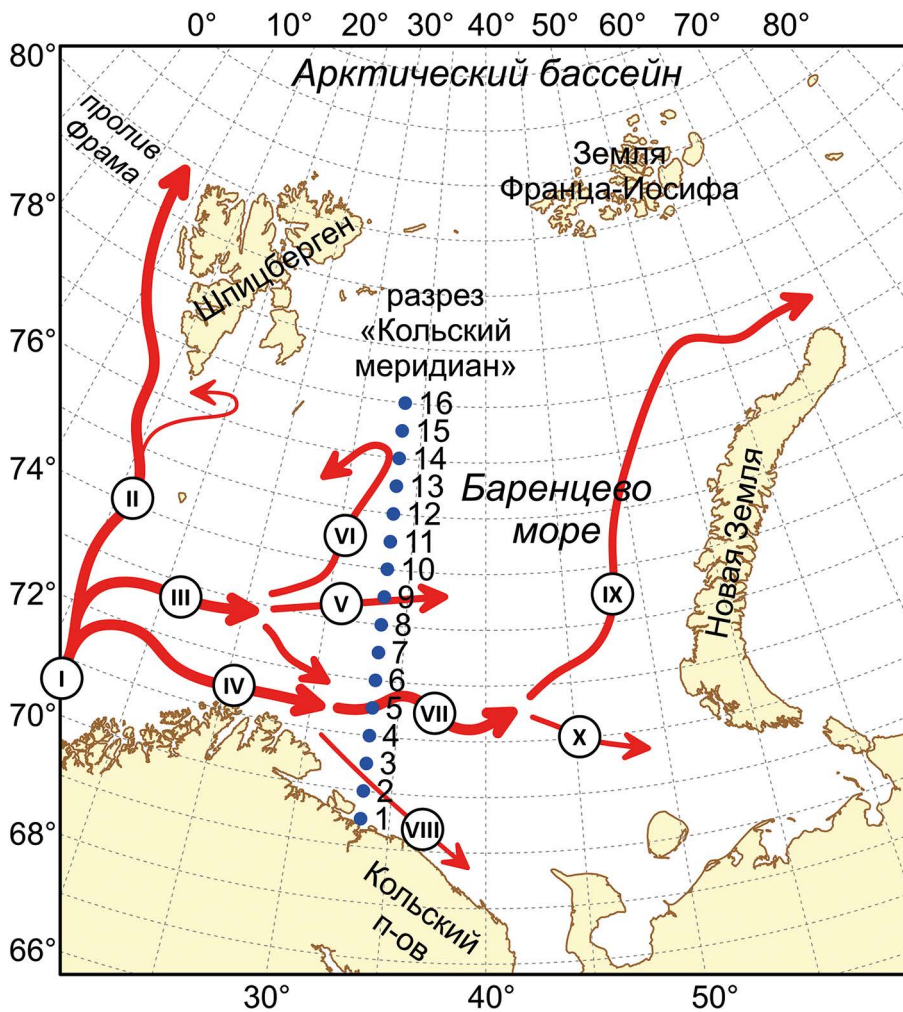
**Practical significance:** The obtained results are useful for a better understanding of the causes of interannual variability of water temperature in the Barents Sea and can be used for its long-term forecasting.

**Keywords:** Barents Sea, Kola section, global climate indices, astrogeophysical factors, harmonics, forecasting water temperature.

## ВВЕДЕНИЕ

Баренцево море – это окраинное шельфовое море Северного Ледовитого океана, которое в силу своего географического положения играет важную роль в водообмене между Северной Атлантикой и Арктическим бассейном [Ingvaldsen et al., 2004; Maslowski et al., 2004; Voitsov et al., 2012; Ожигин и др., 2016]. Тёплые и солёные атлантические воды, поступающие в Арктический бассейн через

Баренцево море и пролив Фрама (рис. 1), формируют океанографические условия не только этого моря, но и Северного Ледовитого океана в целом. Баренцево море является также важным рыбопромысловым бассейном, чья высокая биопродуктивность во многом определяется его океанографическими условиями [Ижевский, 1961; Гершанович, Муромцев, 1983; Ожигин и др., 1999; Шевченко, 2000; Loeng, Drinkwater, 2007; Jakobsen, Ozhigin, 2011; Dalpadado et al., 2014].



**Рис. 1.** Положение разреза «Кольский меридиан» (станции 1–16) и схема тёплых течений в Баренцевом море: Норвежское (I), Шпицбергенское (II), Нордкапское (III) и его Южная (IV), Центральная (V) и Северная (VI) ветви, Основная (VII) и Прибрежная (VIII) ветви Мурманского, Новоземельское (IX), Колгуево-Печорское (X) (по [Трофимов и др., 2025])

**Fig. 1.** Location of the Kola section (stations 1–16) and warm current schematic in the Barents Sea: Norwegian Current (I), Spitsbergen Current (II), North Cape Current (III) and its Southern (IV), Central (V) and Northern (VI) branches, Murman Current (VII), Murman Coastal Current (VIII), Novaya Zemlya Current (IX), Kolguev-Pechora Current (X) (after [Trofimov et al., 2025])

В промысловой океанографии, которая занимается изучением влияния среды обитания на воспроизводство, численность, распределение и поведение промысловых гидробионтов, наиболее часто используемым океанографическим параметром является температура воды. С одной стороны, её легко измерить, а с другой – она выступает в роли одного из основных индикаторов климата и оказывает в разной степени влияние на все биологические процессы в море [Гершанович, Муромцев, 1983; Boitsov et al., 2012]. Исследования сезонных и межгодовых изменений океанографических, в том числе термических, условий и успешное решение задач промысловой океанографии, включая вопросы прогнозирования, невозможны без наличия продолжительных рядов данных, основной источник которых – наблюдения на стандартных океанографических разрезах. Самым широко известным и востребованным разрезом в Баренцевом море является «Кольский меридиан», уникальный как по продолжительности, так и по частоте выполнений, – наблюдения на нём ведутся с 1900 г. [Карсаков и др., 2022]. Этот разрез пересекает основной поток атлантических вод, следующих через Баренцево море, и поэтому данные с него позволяют судить о тепловом состоянии вод всего моря в целом [Ottersen et al., 2005; Бочков, 2005].

В настоящее время всё ещё остаётся актуальной проблема долгосрочного прогнозирования температуры воды Баренцева моря, так как такие прогнозы позволяют иметь представление об ожидаемых изменениях климата и условий среды обитания водных биологических ресурсов и, соответственно, предвидеть возможные последствия этих изменений для промысловых гидробионтов, что служит научной основой для управленческих решений по их рациональной эксплуатации. К сожалению, прогнозирование температуры воды затрудняется большим количеством влияющих на неё факторов и сложными, не всегда полностью понятными, механизмами такого влияния, что обуславливает необходимость продолжения исследований в этом направлении.

Прогнозированию температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» посвящено большое количество работ, значительная часть которых вышла в свет в ПИНРО, где этим вопросом наиболее активно стали заниматься с 1960-х годов. При разработке прогнозов в основном использовали внутреннюю структуру ряда температуры и различные физико-статистические модели, привлекая в качестве предикторов широкий ряд параметров, в том числе космогеофизические [Максимов, Смирнов, 1967; Смирнов и др., 1967; Бочков и др., 1968; Кисляков, 1968; Суставов, 1978; Бочков,

1978, 1979; Методические рекомендации..., 1979, 1989, 1997; Карпова и др., 1989; Ottersen et al., 2000; Аверкиев и др., 2005; Бочков, 2005]. Однако использование в качестве объясняющих переменных одновременно гидрометеорологических и астрогеофизических факторов предпринималось главным образом в последние годы и лишь при изучении изменчивости ледовитости арктических морей [Тимохов и др., 2019; Вязигина и др., 2021; Лис и др., 2023]. Поэтому, учитывая происходящие в последние десятилетия существенные изменения климата в арктических морях [Ingvaldsen et al., 2003; Boitsov et al., 2012; Трофимов и др., 2018; González-Pola et al., 2020, Карсаков и др., 2022], представляется практически полезным проанализировать роль в межгодовых изменениях температуры воды Баренцева моря гидрометеорологических и астрогеофизических факторов, ответственных за изменение климата на планете в целом, и рассмотреть возможность их использования для её долгосрочного прогнозирования.

Цель данной работы – охарактеризовать долгопериодную изменчивость температуры атлантических вод в Баренцевом море на основе материалов, собранных на разрезе «Кольский меридиан» за весь 124-летний период инструментальных наблюдений на нём (1900–2023 гг.), оценить вклад в её межгодовые изменения, а также прогностическую способность глобальных климатических индексов и астрогеофизических параметров.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для анализа долгопериодной изменчивости температуры воды Баренцева моря и оценки влияния на неё гидрометеорологических и астрогеофизических факторов использовались следующие данные за 1900–2023 гг. (среднегодовые, если не сказано иного): температура атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан» (слой 0–200 м, ст. 3–7: 70°30′–72°30′ с.ш. 33°30′ в.д., **Tw**) [Карсаков и др., 2022; собственные данные ПИНРО], глобальный индекс приземной температуры для Северного полушария (**TI**)<sup>1</sup>, зимний (декабрь–март) индекс Северо-Атлантического колебания (**wNAO**)<sup>2</sup>, зимний (ноябрь–март) Северо-Тихоокеанский индекс (**wNPI**)<sup>3</sup>, индекс Атлантиче-

<sup>1</sup> GISS Surface Temperature Analysis (v4). NASA GISS. [https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs\\_v4/](https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/). 28.03.2025.

<sup>2</sup> Hurrell North Atlantic Oscillation (NAO) Index (PC-based). NCAR. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-pc-based>. 28.03.2025.

<sup>3</sup> North Pacific (NP) Index by Trenberth and Hurrell; monthly and winter. NCAR. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/north-pacific-np-index-trenberth-and-hurrell-monthly-and-winter>. 28.03.2025.

ского мультидекадного колебания (AMO)<sup>4</sup>, солнечная активность (число солнечных пятен, SN)<sup>5</sup>, интенсивность солнечного излучения (TSI)<sup>6</sup>, X- и Y-координаты полюса Земли (Xp, Yp), а также нутация оси вращения Земли в долготу и наклоне (dPsi, dEps)<sup>7</sup>. Аномалии рассчитывались относительно среднесреднеголетних (1901–2020 гг.) значений, их нормирование выполнялось с помощью стандартного отклонения ( $\sigma$ ) за тот же период.

В работе применялись методы описательной статистики, а также сравнительный, корреляционный, регрессионный и гармонический анализы [Елисеева, Юзбашев, 2004; Протасов, Юров, 2016; Малинин, 2020]. Статистическая обработка данных и построение графиков выполнялись в программе Microsoft Excel 2016.

Достоверность трендов в изменениях температуры воды оценивалась с помощью критерия Стьюдента и соответствующего ему уровня значимости p-value. Если p-value был меньше 0,05, тренд считался статистически значимым с вероятностью 95%, а если меньше 0,01, то, соответственно, с вероятностью 99% [Коросов, Горбач, 2007]. Аналогичный подход использовался при оценке значимости рассчитанных в работе коэффициентов корреляции.

В ходе гармонического анализа из исходных данных вначале исключался линейный или квадратичный тренд, и только после этого они раскладывались в ряд Фурье для выделения отдельных гармоник. Отделение значимых гармоник от незначимых выполнялось следующим способом [Малинин, 2008]: поскольку вклад гармоник интерпретируется как коэффициент детерминации (т.е. та часть дисперсии исходного ряда, которая описывается этой гармоникой), извлекая из него квадратный корень, получаем коэффициент корреляции между рассматриваемой гармоникой и зависимой переменной, значимость которого и, соответственно, значимость гармоники, оценивается по критерию Стьюдента и соответствующему ему p-value.

Расчёт вклада независимых переменных (предикторов) в изменчивость зависимой переменной (функции отклика) в уравнениях регрессии выполнялся по формуле:

$$\Delta_j = 100 \times r(x_j, y) \times \beta_j,$$

где  $\Delta_j$  – вклад (%) j-го предиктора,  $r(x_j, y)$  – коэффициент парной корреляции между j-м предиктором и функцией отклика,  $\beta_j$  – стандартизованный коэффициент регрессии при j-м предикторе, связанный с обычным коэффициентом регрессии  $b_j$  выражением:  $\beta_j = b_j \times \sigma(x_j) / \sigma(y)$ , где  $\sigma(x_j)$  – стандартное отклонение j-й независимой переменной,  $\sigma(y)$  – стандартное отклонение зависимой переменной [Малинин, 2008].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В 1900–2023 гг. температура атлантических вод в Баренцевом море претерпевала значительные межгодовые изменения, происходившие на фоне статистически значимого положительного тренда ( $R^2 = 0,287$ , p-value < 0,001), объясняющего 29% её дисперсии и показывающего увеличение среднегодовой температуры на 0,08 °C каждые 10 лет. Наиболее интенсивный её рост (0,37 °C за 10 лет) начался с конца 1970-х годов, линейный тренд ( $R^2 = 0,617$ , p-value < 0,001) с 1978 по 2023 г. объяснял 62% изменчивости температуры воды в Баренцевом море. Используя нормированные аномалии температуры и их кумулятивную кривую, с 1900 г. по настоящее время выделено два холодных (1900–1929 и 1963–1988 гг.) и два тёплых (1930–1962 и 1989–2023 гг.) периода. Аномально холодными годами (со среднегодовой температурой 2,8–3,1 °C, что ниже нормы на 1,5 $\sigma$  и более) были 1902, 1903, 1912, 1917, 1966, 1978, 1979 и 1981, а аномально тёплыми годами (4,9–5,4 °C, выше нормы на 1,5 $\sigma$  и более) – 2006, 2007, 2012, 2013, 2015–2018 и 2023 (рис. 2).

Практически такие же периоды были выделены ранее В.Д. Бойцовым для 1900–2009 гг. на основе разработанного им климатического индекса [Boitsov et al., 2012]. Отличие состоит в том, что в настоящей работе выделение периодов выполнено на основе более продолжительного ряда данных (по 2023 г.). Также 1962 г. по температуре атлантических вод отнесён к тёплому периоду, тогда как по климатическому индексу – к холодному, хотя это спорный момент, так как нормированная аномалия температуры в этот год фактически была равна нулю, хотя при этом формально оставалась положительной (+0,001 °C).

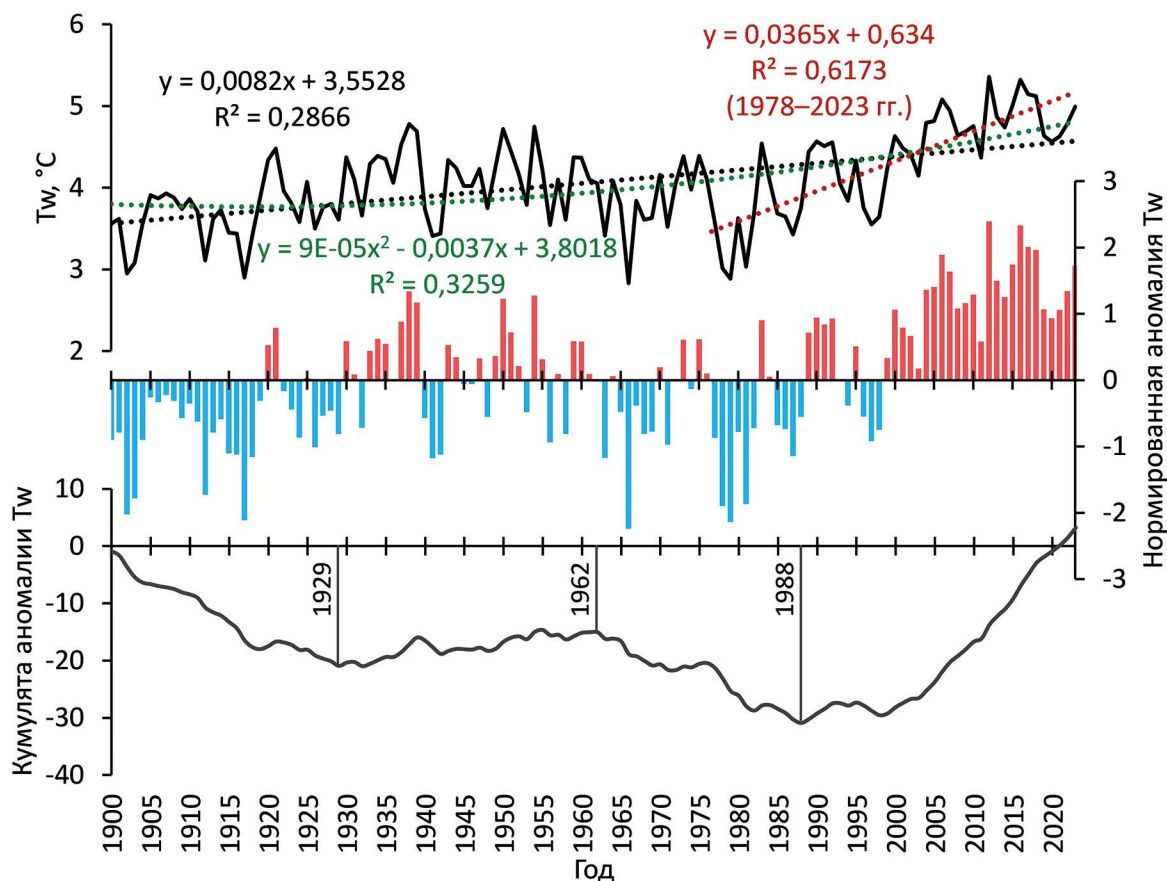
Холодные периоды оказались близки по статистическим характеристикам температуры воды (рис. 3). Её среднее значение в 1900–1929 и 1963–1988 гг. составляло 3,7 °C, а размах колебаний – 1,6 и 1,7 °C соответственно. При этом изменчивость температуры в 1963–1988 гг. ( $\sigma = 0,45$  °C) превышала такую в 1900–1929 гг. ( $\sigma = 0,36$  °C). Тёплые периоды

<sup>4</sup> AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) Index. NOAA NCDC. <https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/cmb/ersst/v5/index/>. 28.03.2025.

<sup>5</sup> Total Sunspot Number. SIDC. <https://www.sidc.be/SILSO/datafiles>. 28.03.2025.

<sup>6</sup> Total Solar Irradiance. LASP. [https://lasp.colorado.edu/lisird/data/nrl2\\_tsi\\_P1Y](https://lasp.colorado.edu/lisird/data/nrl2_tsi_P1Y). 28.03.2025.

<sup>7</sup> Earth Orientation Data. IERS. <https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/EarthOrientationData/eop.html>. 28.03.2025.



**Рис. 2.** Температура воды ( $T_w$ ) в слое 0–200 м на разрезе «Кольский меридиан» (Основная ветвь Мурманского течения) в Баренцевом море, её нормированные аномалии и их кумулятивная кривая в 1900–2023 гг. Пунктирными линиями показаны тренды

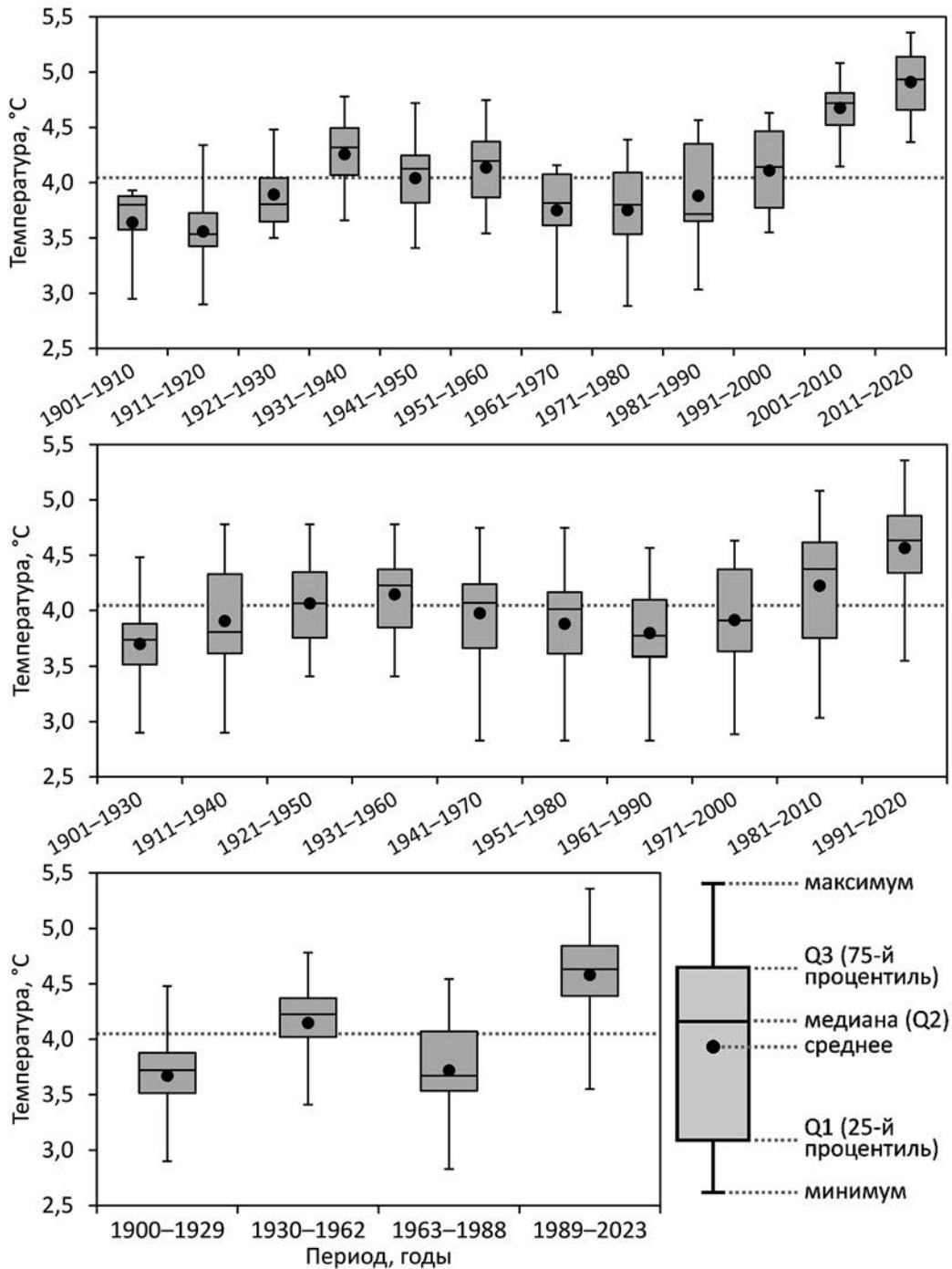
**Fig. 2.** Water temperature ( $T_w$ ) in the 0–200 m layer in the Kola section (the Murman Current) in the Barents Sea, its normalized anomalies and their cumulative curve in 1900–2023. Dashed lines show trends

отличались друг от друга по всем трём характеристикам: средняя температура (4,6 °C), её размах (1,8 °C) и стандартное отклонение (0,44 °C) в 1989–2023 гг. были выше, чем в 1930–1962 гг. (4,2, 1,4 и 0,37 °C соответственно). Таким образом, современное потепление характеризуется большей интенсивностью, чем предыдущее, тогда как холодные периоды в этом отношении были похожи.

Если взглянуть на статистические характеристики температуры воды за разные десятилетия (см. рис. 3), то видно, что наибольшая её изменчивость ( $\sigma = 0,51...0,52$ , размах 1,5 °C) наблюдалась в преддверии современного потепления, в 1970-е и 1980-е гг., затем она стала уменьшаться, достигнув в 2000-е гг. минимума ( $\sigma = 0,27$ , размах 0,9 °C). Современное потепление характеризуется постоянным ростом среднедекадной температуры, которая в течение последних четырёх десятилетий непрерывно увеличивалась от 3,8 °C в 1970-е гг. до рекордных 4,9 °C в 2010-е годы.

На рис. 3 также показано, насколько сильно меняются климатические нормы, рассчитанные согласно рекомендациями Всемирной метеорологической организации за скользящие 30-летние периоды. Так, норма за 1991–2020 гг. (4,6 °C) на 0,8 °C (т.е. на 1,6 $\sigma$ ) превышает норму за 1961–1990 гг. (3,8 °C). Таким образом, при расчёте аномалий температуры воды и определении на их основе тёплых и холодных лет крайне важен выбор нормы (точнее периода, за который она рассчитывается), так как это скажется не только на величине аномалий, но и на их знаке. В результате годы, определённые как тёплые по одной норме, могут оказаться холодными в соответствии с другой. Именно поэтому в данной работе во избежание подобной ситуации и для большей объективности норма рассчитывалась практически за весь рассматриваемый период (1901–2020 гг.).

В изменениях температуры атлантических вод в Баренцевом море, кроме трендовой составляющей,



**Рис. 3.** Диаграммы размаха температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» для разных периодов (10-летних, 30-летних, а также холодных 1900–1929, 1963–1988 гг. и тёплых 1930–1962, 1989–2023 гг.) в 1900–2023 гг. Пунктирной линией показана норма за 1901–2020 гг.

**Fig. 3.** Boxplots of water temperature in the Kola section for different periods (10-year, 30-year, as well as cold 1900–1929, 1963–1988 and warm 1930–1962, 1989–2023) in 1900–2023. Dashed line shows the 1901–2020 average

присутствуют циклические компоненты. Прежде чем анализировать их, ряд температуры был детрендирован путём удаления из него квадратичного тренда ( $R^2 = 0,326$ ,  $p\text{-value} < 0,001$ ), который лучше описывает общую тенденцию ряда, нежели линейный тренд

(см. рис. 2). Гармонический анализ позволил выявить гармоники с периодами 5; 5,6; 7,8; 10,3; 13,8; 17,7 и 62 года, вклад которых в дисперсию детрендированного ряда составил 3,1; 4,6; 9,5; 3,2; 9,1; 3,1 и 19,9% соответственно (рис. 4). Таким образом, наи-

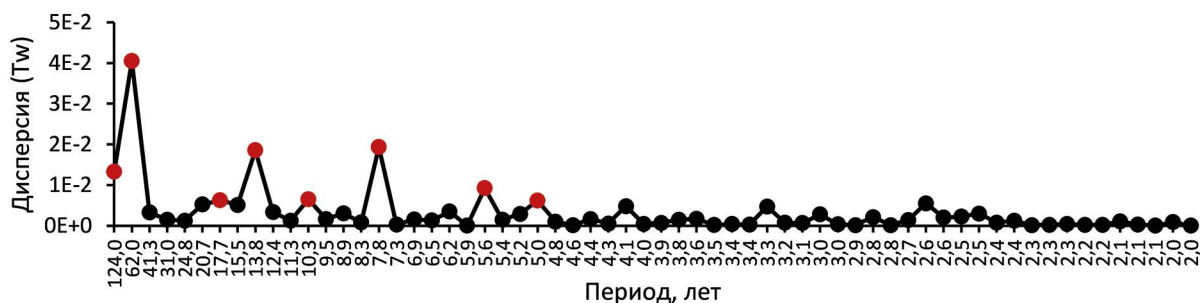


Рис. 4. Периодограмма температуры воды (Tw) на разрезе «Кольский меридиан» для 1900–2023 гг. Красными кружочками показаны статистически значимые гармоники

Fig. 4. Periodogram of water temperature (Tw) in the Kola section for 1900–2023. Red circles indicate statistically significant harmonics

большой вклад в изменчивость температуры воды Баренцева моря вносят квадратичный тренд (32,6%) и низкочастотная циклическая компонента с периодом 62 года (13,4% дисперсии исходного недетрендированного ряда), которая как раз и определяет наблюдаемые периоды похолодания и потепления.

В других работах [Ижевский, 1961; Бочков, 1982; Loeng et al., 1992; Ottersen et al., 2000; Бойцов, 2007; Бойцов и др., 2010; Бойцов, Гузенко, 2021] на более коротких рядах температуры воды Баренцева моря выделяли гармоники с периодами 2,5–2,6, 3,1–3,3, 5–6, 7–8, 8,9, 10–11, 13, 15–18 и 18,6 года. Отличия в выявленных периодах могут быть обусловлены не только характером самих рядов (анализировалась температура разных слоёв (0–50, 50–200, 0–200 м) на разрезе «Кольский меридиан», ряды отличались по длине и охватываемому периоду), но и методологическими причинами (разные способы анализа и их особенности).

Среди глобальных климатических индексов больше всего статистически значимых гармоник обнаружено в рядах wNAO (10) и wNPI (9), объясняющих в сумме 50,5 и 41,3% изменчивости ряда соответственно, а по отдельности – от 3,3 до 8,1% (рис. 5). В рядах TI и АМО наиболее ярко выраженной была 62-летняя гармоника, описывающая 46,8 и 35,6% дисперсии ряда соответственно (см. рис. 5). Физическая суть этих индексов заключается в следующем. Зимний индекс Северо-Атлантического колебания (wNAO) отражает изменения в силе двух центров действия атмосферы (циклона вблизи Исландии и антициклона вблизи Азорских островов) в декабре–марте, т.е. характеризует атмосферную циркуляцию в средних широтах Северной Атлантики зимой. Зимний Северо-Тихоокеанский индекс (wNPI) показывает изменения атмосферы в северной части Тихого океана, включая интенсивность Алеутского минимума, в ноябре–марте. Глобальный индекс приземной температуры Северно-

го полушария (TI) представляет собой осреднённые аномалии температуры у поверхности земли: приземной температуры воздуха над континентами и температуры поверхности океана. Индекс Атлантического мультideкадного колебания (АМО) отражает долгопериодные изменения среднегодовой температуры поверхности океана в Северной Атлантике и позволяет учесть влияние адвективного переноса тепла, поступающего в высокие широты с Северо-Атлантическим течением.

Среди астрогеофизических факторов наибольшую часть дисперсии рядов SN (число солнечных пятен) и TSI (интенсивность солнечного излучения) описывают гармоники с периодами 10,3 и 11,3 года (в сумме 75,0 и 65,6% соответственно), рядов dPsi и dEps (нута́ция оси вращения Земли в долготе и наклоне) – гармоники с периодами 17,7 и 20,7 года (в сумме 82,9 и 60,8%), а рядов Xp и Yp (координаты полюса Земли) – квази-шестилетняя (21,4 и 25,1%), 31-летняя (21,2% для Xp) и 62-летняя (13,6 и 21,4%) гармоники (рис. 6).

В других работах [Гудкович и др., 2009; Тимохов и др., 2019; Вязигина и др., 2021; Лис и др., 2023] в гидрометеорологических и астрогеофизических параметрах на основе рядов различной продолжительности выделялся широкий набор гармоник с периодами 2,3–2,8, 3,3–5,7, 6–8, 9–14, 16–20, 22, 32, 39, 50–60 и 180–200 лет, что хорошо согласуется с результатами данной работы с учётом описанной выше особенности использовавшегося гармонического анализа.

Таким образом, в результате гармонического анализа выявлено, что ряды глобальных климатических индексов и астрогеофизических факторов содержат циклические компоненты, присутствующие также в температуре атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан», что указывает на существование связи между этими переменными и позволяет использо-

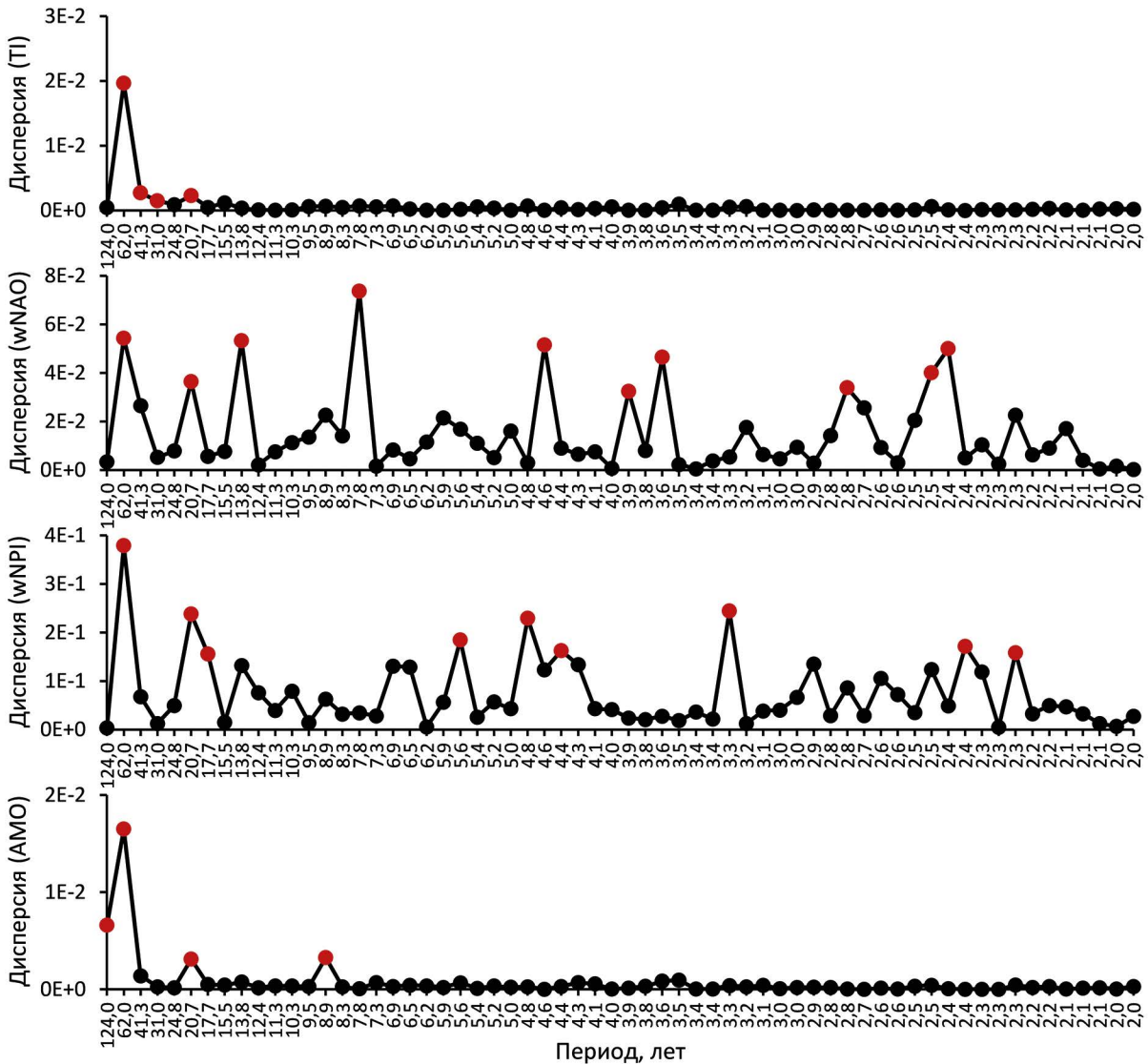
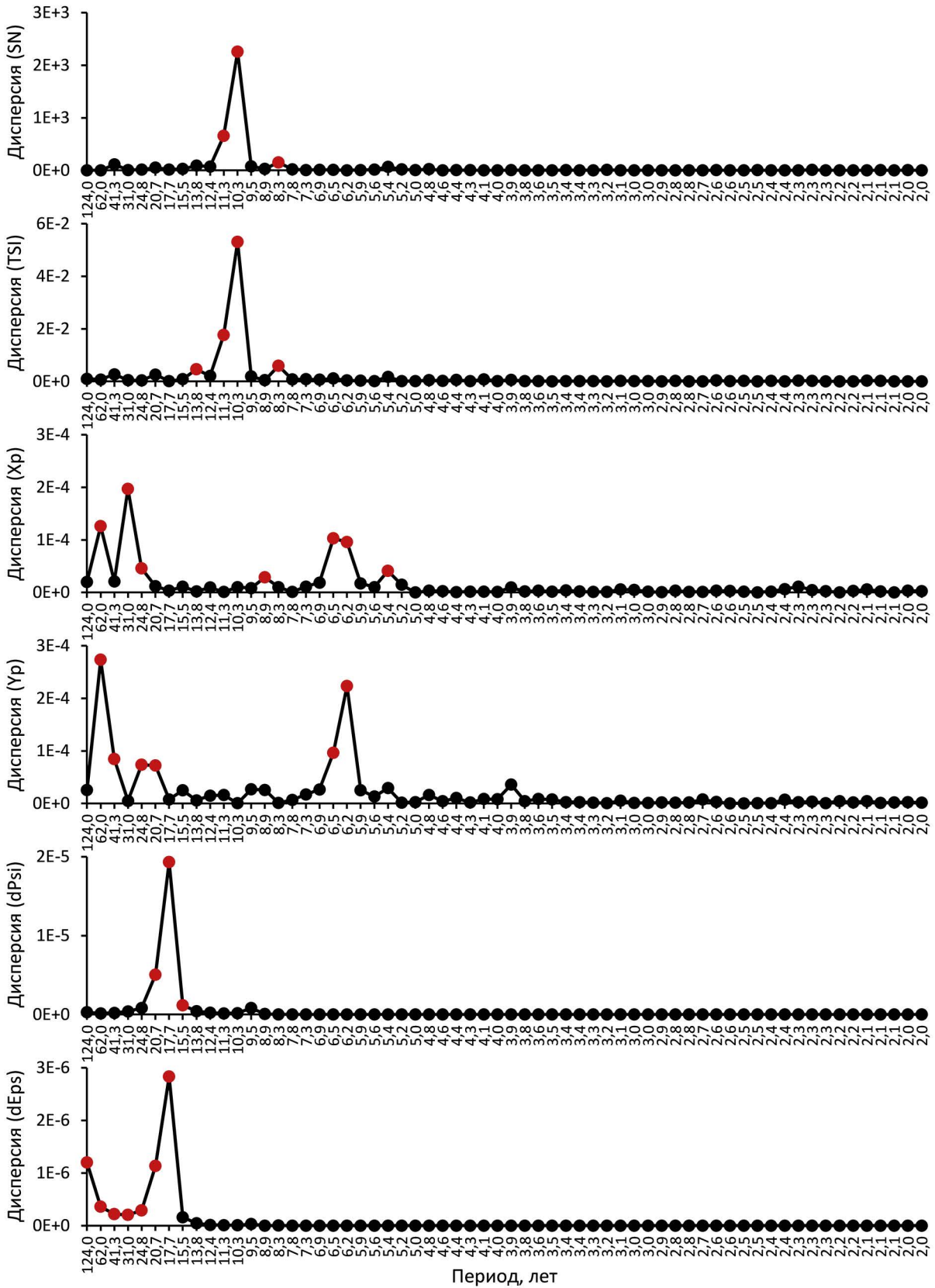


Рис. 5. Периодограммы глобальных климатических индексов (TI, wNAO, wNPI, AMO) для 1900–2023 гг. Красными кружочками показаны статистически значимые гармоники

Fig. 5. Periodograms of global climate indices (TI, wNAO, wNPI, AMO) for 1900–2023. Red circles indicate statistically significant harmonics

вать гидрометеорологические и астрогеофизические параметры для объяснения долгопериодных изменений в температуре воды Баренцева моря. Периоды совпадающих гармоник составили 5,6; 7,8; 10,3; 13,8; 17,7 и 62 года (табл. 1). Гармоники с периодами около 6–8 лет соответствуют циклу колебаний положения полюса Земли (её мгновенной оси вращения) – нутации, под влиянием которых центробежная сила планеты не остаётся постоянной, что, в результате, приводит к явлению, получившему название «полюсной прилив», который вызывает изменения уровня Мирового океана и может влиять на атмосферную и океаническую циркуляцию [Бойцов, 2007]. Гармоника с периодом 10,3 года соответствует 11-летнему солнечно-

му циклу (цикл Швабе или Швабе-Вольфа) – наиболее заметно выраженный цикл солнечной активности, длящийся примерно 11 лет (его длина в XVIII–XX веках изменялась от 8 до 14 лет, а в XX веке в среднем была ближе к 10,5 годам) и характеризующийся довольно быстрым (в течение примерно 4 лет) ростом числа солнечных пятен и последующим, более медленным (около 7 лет), его уменьшением [Герман, Голдберг, 1981]. Гармоника с периодом 17,7 года близка к многолетнему (18,6 года) лунному нодальному (деклинационному) приливу в Мировом океане, вызванному циклическими изменениями склонения Луны и влияющему как на изменения уровня моря и течения, так и на формирование многолетней



**Таблица 1.** Периоды циклических колебаний температуры воды на разрезе «Кольский меридиан», глобальных климатических индексов и астрогеофизических параметров, выделенные с помощью гармонического анализа за 1900–2023 гг.

**Table 1.** Periods of cyclic fluctuations in water temperature in the Kola section, global climate indices and astrogeophysical parameters, identified using harmonic analysis for 1900–2023

Индекс/ параметр	Периоды циклических колебаний, лет				
	<4	4–8	9–13	14–24	>24
Tw	–	<b>5; 5,6; 7,8</b>	10,3	<b>13,8; 17,7</b>	62
TI	–	–	–	20,7	31; 41,3; <b>62</b>
wNAO	2,4; 2,5; 2,8; 3,6; 3,9	4,6; <b>7,8</b>	–	<b>13,8; 20,7</b>	62
wNPI	2,3; 2,4; 3,3	4,4; 4,8; <b>5,6</b>	–	<b>17,7; 20,7</b>	62
AMO	–	–	8,9	20,7	62
SN	–	8,3	<b>10,3; 11,3</b>	–	–
TSI	–	8,3	<b>10,3; 11,3</b>	13,8	–
Xp	–	5,4; 6,2; 6,5	8,9	–	24,8; 31; <b>62</b>
Yp	–	6,2; 6,5	–	20,7	24,8; 41,3; <b>62</b>
dPsi	–	–	–	15,5; <b>17,7; 20,7</b>	–
dEps	–	–	–	<b>17,7; 20,7</b>	24,8; 31; 41,3; <b>62</b>

*Примечание:* жирным выделены периоды, совпадающие с циклами температуры воды; все представленные гармоники статистически значимы с вероятностью 95%

изменчивости циркуляции атмосферы [Воробьев и др., 2006]. Гармоника с периодом 62 года соответствует 60-летнему солнечному циклу Фритца, который связан с изменением расстояния между Землёй и Солнцем из-за диссимметрии Солнечной системы – смещения центра Солнца относительно центра масс (барицентра) Солнечной системы под влиянием планет, главным образом, Юпитера и Сатурна, в результате

чего формируется циклическое (с периодом около 60 лет) колебание притока солнечной радиации, поскольку он обратно пропорционален квадрату расстояния между Землёй и Солнцем, что отражается в изменениях состояния атмосферы и океана [Гудкович и др., 2009].

В ходе корреляционного анализа (табл. 2) выявлены статистически значимые ( $p$ -value < 0,001) прямые

**Таблица 2.** Коэффициенты корреляции Пирсона ( $r$ ) между температурой воды на разрезе «Кольский меридиан» ( $T_w$ , °C) и влияющими на неё факторами, взятыми с временными лагами (в годах), на которых отмечена наиболее тесная связь. Статистическая значимость коэффициентов корреляции оценена с помощью уровня значимости  $p$ -value

**Table 2.** Pearson correlation coefficients ( $r$ ) between water temperature in the Kola section ( $T_w$ , °C) and the factors influencing it, taken with time lags (in years) showing the strongest correlation. The statistical significance of the correlation coefficients was assessed using  $p$ -value

Влияющий фактор	R	P-value	Лag
Глобальный индекс приземной температуры для Северного полушария (TI, °C)	0,65	<0,001	0
	0,65	<0,001	2
	0,65	<0,001	7
Зимний (декабрь–март) индекс Северо-Атлантического колебания (wNAO)	0,36	<0,001	0
	0,38	<0,001	16
Зимний (ноябрь–март) Северо-Тихоокеанский индекс (wNPI, гПа)	–0,29	0,002	9
Индекс Атлантического мультидекадного колебания (AMO)	0,62	<0,001	2
	0,63	<0,001	6
Солнечная активность (число солнечных пятен) (SN)	–0,19	0,039	7
Интенсивность солнечного излучения (TSI, Вт/м <sup>2</sup> )	0,30	0,001	2
X-координата полюса Земли (Xp, угловая секунда)	0,59	<0,001	0
	0,51	<0,001	6
Y-координата полюса Земли (Yp, угловая секунда)	0,53	<0,001	2
Нутация оси вращения Земли в долготу (dPsi, угловая секунда)	–0,53	<0,001	0
Нутация оси вращения Земли в наклоне (dEps, угловая секунда)	–0,52	<0,001	0

связи между температурой атлантических вод Баренцева моря и такими факторами, как глобальный индекс приземной температуры (без лага и с лагами 2 и 7 лет), зимний индекс Северо-Атлантического колебания (без лага и с лагом 16 лет), индекс Атлантического мультидекадного колебания (с лагами 2 и 6 лет), интенсивность солнечного излучения (с лагом 2 года) и положение полюса Земли (без лага и с лагами 2 и 6 лет), а также значимые ( $p$ -value < 0,040) обратные связи между температурой воды и зимним Северо-Тихоокеанским индексом (с лагом 9 лет), солнечной активностью (с лагом 7 лет) и нутацией оси вращения Земли в долготе и наклоне (без лага). Наиболее тесная связь ( $p$ -value <  $1 \cdot 10^{-12}$ ) отмечена с глобальным индексом приземной температуры Северного полушария ( $r = 0,65$ , без лага и с лагами 2 и 7 лет), индексом Атлантического мультидекадного колебания ( $r = 0,62 \dots 0,63$ , с лагами 2 и 6 лет) и X-координатой полюса Земли ( $r = 0,59$ , без лага).

В ходе регрессионного анализа всех переменных из раздела «Материалы и методы» построены уравнения множественной линейной регрессии для температуры атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан», включающие в себя все возможные комбинации объясняющих переменных, взятых с лагами, на которых связь с температурой была наилучшей (см. табл. 2). При этом из всех построенных уравнений в дальнейшем имеет смысл использовать лишь те, что включают не более пяти предикторов, так как последующее увеличение их количества практически не улучшает информационную способность модели: рост  $R^2$  составляет всего 0,01, что соответствует 1% объяснённой дисперсии. В итоге для дальнейшего анализа выбраны три уравнения, по одному наилучшему (с наибольшим  $R^2$ ) из наборов с тремя, четырьмя и пятью предикторами:

$$T_w = 4,157 + 0,1856 \cdot wNAO + 0,1594 \cdot wNAO_{-16} + 0,9621 \cdot AMO_{-6}, \quad (1)$$

$$T_w = 4,288 + 0,1737 \cdot wNAO + 0,1559 \cdot wNAO_{-16} + 0,9740 \cdot AMO_{-6} - 0,001460 \cdot SN_{-7}, \quad (2)$$

$$T_w = 4,267 + 0,1698 \cdot wNAO + 0,1429 \cdot wNAO_{-16} + 0,3985 \cdot AMO_{-2} + 0,6730 \cdot AMO_{-6} - 0,001415 \cdot SN_{-7}. \quad (3)$$

Все коэффициенты регрессии в уравнениях 1–3 статистически значимые ( $p$ -value < 0,020), а  $R^2$  составил 0,590, 0,623 и 0,643 соответственно ( $p$ -value << 0,001), т.е. эти уравнения объясняют 59, 62 и 64% изменчивости температуры воды Баренцева моря. Вклад отдельных предикторов в дисперсию зависимой переменной представлен в табл. 3, из которой видно, что наибольший вклад в межгодовые изменения температуры атлантических вод на разрезе

«Кольский меридиан» вносит Атлантическое мультидекадное колебание (34–38%), следом идёт Северо-Атлантическое колебание (23–25%), а на солнечную активность приходится всего 4%. При этом добавление в качестве предиктора АМО с лагом 2 года снижает вклад АМО с лагом 6 лет примерно на 10%, но несколько увеличивает общий вклад индекса Атлантического мультидекадного колебания (на 4% – до 38%).

Регрессионные уравнения для прогностических целей отбирались среди тех, что включали лишь предикторы, опережающие зависимую переменную. В итоге были выбраны четыре уравнения, включающие в себя от трёх до пяти факторов: зимний индекс Северо-Атлантического колебания с лагом 16 лет, зимний Северо-Тихоокеанский индекс с лагом 9 лет, индекс Атлантического мультидекадного колебания с лагами 2 и 6 лет, солнечную активность с лагом 7 лет и X-координату полюса Земли с лагом 6 лет, которые позволяют составлять сверхдолгосрочные прогнозы температуры атлантических вод в Баренцевом море с заблаговременностью 2 года (уравнение 6) и 6 лет (уравнения 4, 5 и 7):

$$T_w = 4,314 + 0,1613 \cdot wNAO_{-16} + 1,0229 \cdot AMO_{-6} - 0,001783 \cdot SN_{-7}, \quad (4)$$

$$T_w = 4,250 + 0,1679 \cdot wNAO_{-16} + 0,7807 \cdot AMO_{-6} - 0,001908 \cdot SN_{-7} + 3,217 \cdot Xp_{-6}, \quad (5)$$

$$T_w = 4,290 + 0,1467 \cdot wNAO_{-16} + 0,4434 \cdot AMO_{-2} + 0,6866 \cdot AMO_{-6} - 0,001724 \cdot SN_{-7}, \quad (6)$$

$$T_w = 38,985 + 0,1696 \cdot wNAO_{-16} - 0,03441 \cdot wNPI_{-9} + 0,7185 \cdot AMO_{-6} - 0,001966 \cdot SN_{-7} + 3,225 \cdot Xp_{-6}. \quad (7)$$

В уравнениях 4–7 все коэффициенты регрессии статистически значимые ( $p$ -value < 0,040), а  $R^2$  составил 0,518, 0,551, 0,543 и 0,569 соответственно ( $p$ -value << 0,001), т.е. эти уравнения объясняют 52, 55, 54 и 57% изменчивости температуры воды в Баренцевом море. Вклад отдельных предикторов, взятых с лагами, в дисперсию прогнозируемой переменной представлен в табл. 4, из которой видно, что в прогностических уравнениях регрессии наибольший вклад в межгодовые изменения температуры атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан» вносит Атлантическое мультидекадное колебание (25–40%), за ним следуют Северо-Атлантическое колебание (10–11%) и X-координата полюса Земли (11%), а на Северо-Тихоокеанский индекс и солнечную активность приходится всего 4 и 5% соответственно. При этом добавление в уравнение 6 (относительно уравнения 4) в качестве предиктора АМО с лагом 2 года снижает на 12% вклад АМО с лагом 6 лет, одновременно увеличивая на 4% общий вклад индекса Атлантического мультидекадного колебания, который достигает

**Таблица 3.** Вклад (%) влияющих факторов в изменчивость температуры атлантических вод в Баренцевом море в уравнениях 1–3 (индекс указывает на лаг предиктора в годах)**Table 3.** Contribution (%) of influencing factors to the variability of Atlantic water temperature in the Barents Sea in equations 1–3 (the index indicates the lag of the predictor in years)

Уравнение регрессии	Влияющий фактор				
	wNAO	wNAO <sub>-16</sub>	AMO <sub>-2</sub>	AMO <sub>-6</sub>	SN <sub>-7</sub>
Уравнение 1	14,4	10,6		34,0	
Уравнение 2	13,4	10,4	–	34,4	4,0
Уравнение 3	13,1	9,5	14,0	23,8	3,9

**Таблица 4.** Вклад (%) влияющих факторов в изменчивость температуры атлантических вод в Баренцевом море в уравнениях 4–7 (индекс указывает на лаг предиктора в годах)**Table 4.** Contribution (%) of influencing factors to the variability of Atlantic water temperature in the Barents Sea in equations 4–7 (the index indicates the lag of the predictor in years)

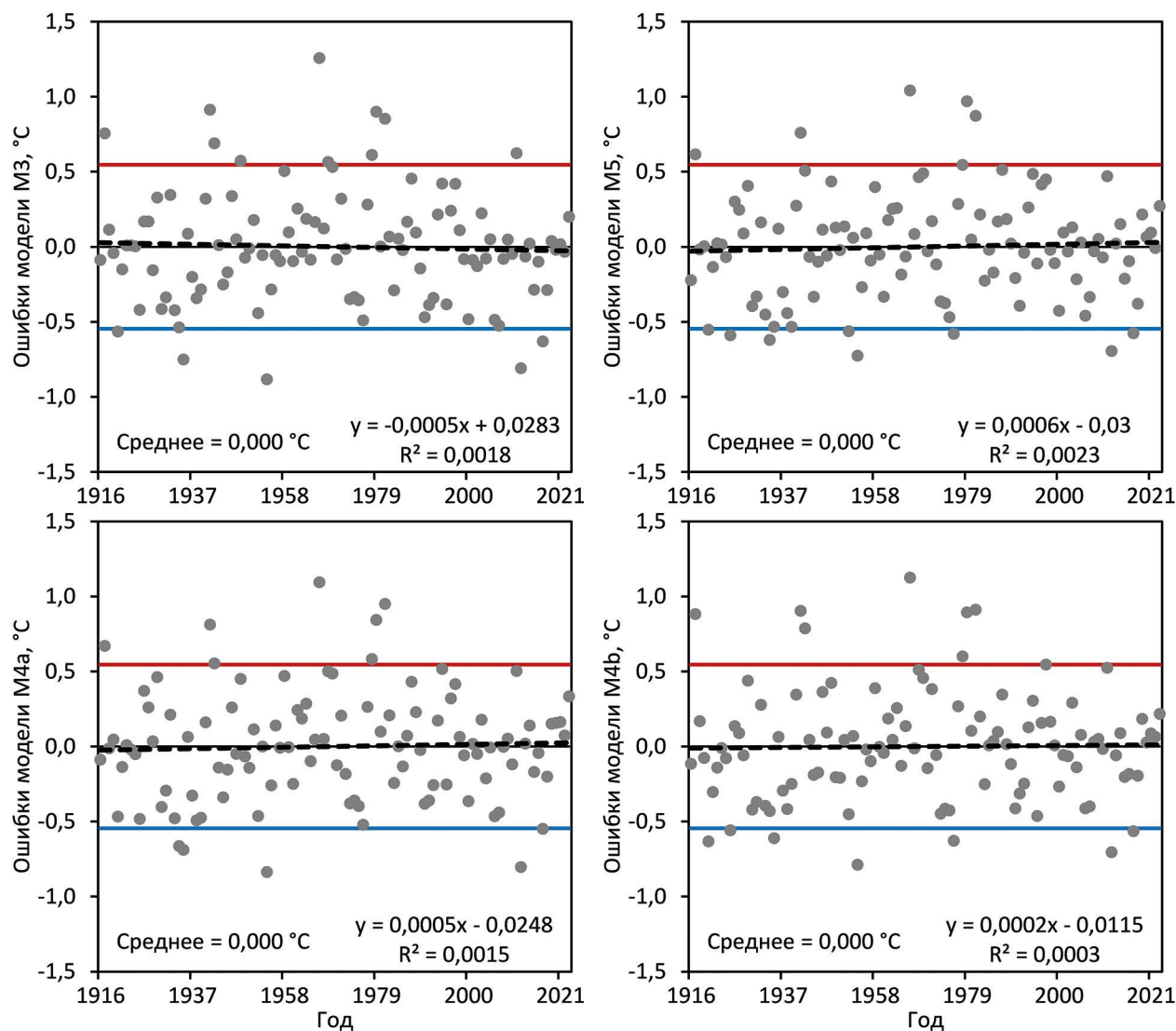
Уравнение регрессии	Влияющий фактор					
	wNAO <sub>-16</sub>	wNPI <sub>-9</sub>	AMO <sub>-2</sub>	AMO <sub>-6</sub>	SN <sub>-7</sub>	Xp <sub>-6</sub>
Уравнение 4	10,7	–	–	36,2	4,9	–
Уравнение 5	11,2	–	–	27,6	5,2	11,1
Уравнение 6	9,8	–	15,5	24,3	4,7	–
Уравнение 7	11,3	3,7	–	25,4	5,4	11,1

40%. Тогда как включение в уравнения 5 и 7 X-координаты полюса Земли, а в уравнение 7 дополнительно Северо-Тихоокеанского индекса уменьшает вклад АМО (относительно уравнения 4) на 9 и 11% соответственно. Поскольку X-координата полюса Земли определяет наклон её оси вращения, от чего зависит степень нагрева поверхности Земли и воздуха вследствие инсоляции, очевидно, что этот фактор должен оказывать влияние на изменения температуры воды как в Баренцевом море, так и в Северной Атлантике. Поэтому, после его введения в уравнение регрессии в качестве предиктора, он, возможно, «перетянул» на себя ту часть объяснённой моделью дисперсии функции отклика, что ранее объяснял опосредованно через индекс Атлантического мультидекадного колебания, отражающий изменчивость температуры поверхности Северной Атлантики.

Известно [Бородич, 2000], что статистическая значимость коэффициентов (параметров) регрессии и близкий к единице коэффициент детерминации  $R^2$  не гарантируют высокое качество уравнения регрессии. Согласно теореме Гаусса-Маркова, оценки параметров регрессионной модели являются несмещёнными, состоятельными и эффективными, а сама модель адекватной и надёжной лишь при выполнении предпосылок использования метода наименьших квадратов – ряда предположений относительно её остатков (разностей между фактическими и рассчитанными

по уравнению регрессии значениями зависимой переменной), а именно: (1) математическое ожидание, т.е. среднее арифметическое, остатков равно нулю, (2) остатки независимы от объясняющих переменных, (3) дисперсия остатков постоянна (условие гомоскедастичности), (4) автокорреляция остатков отсутствует, а (5) их распределение подчиняется нормальному закону [Малинин, 2008].

Для проверки оптимальности выбранных для прогноза температуры воды уравнений регрессии (далее в качестве синонима также будет использоваться термин «регрессионная модель») выполнен подробный анализ их остатков. На рис. 7 видно, что во всех случаях среднее арифметическое остатков равно нулю, что указывает на отсутствие систематической ошибки в определении положения линии регрессии, т.е. оценки коэффициентов регрессии являются несмещёнными. Тренд (нестационарность по математическому ожиданию) в распределении остатков отсутствует, распределение не зависит от времени – наблюдается равномерно заполненная полоса рассеяния, параллельная оси абсцисс, т.е. в функции отклика нет неучтённого тренда. Коэффициенты линейной корреляции Пирсона между остатками регрессионных моделей 4–7 и включёнными в них предикторами оказались статистически незначимыми ( $p$ -value = 0,986...0,999), точно так же как и коэффициенты ранговой корреляции Спирмена



**Рис. 7.** Ошибки регрессионных моделей М3, М4а, М4б и М5 (уравнения 4–7). Цифры в названиях моделей указывают на количество предикторов. Пунктирной линией показан линейный тренд (также приведены уравнение и коэффициент детерминации тренда), красной и синей сплошными линиями – предельно допустимые ошибки ( $\pm 1\sigma$ )

**Fig. 7.** Errors of regression models M3, M4a, M4b and M5 (equations 4–7). The numbers in model names indicate the number of predictors. The dashed line shows a linear trend (the equation and the coefficient of determination of the trend are also given), the red and blue solid lines show maximum permissible errors ( $\pm 1\sigma$ )

( $p$ -value = 0,513...0,994), что свидетельствует о независимости остатков от объясняющих переменных, т.е. о несмещённости и состоятельности оценок параметров этих моделей, и подтверждает корректность выбора линейного вида регрессии.

Проверка остатков на гомоскедастичность (стационарность по дисперсии) выполнена путём расчёта коэффициента ранговой корреляции Спирмена между абсолютными величинами (модулями) остатков и отдельными предикторами, а также их линейной комбинацией, т.е. зависимой переменной, рассчитанной по уравнению регрессии [Бородич, 2000]. Для всех четырёх моделей (4–7) данные коэффициенты оказались

статистически незначимыми ( $p$ -value = 0,073...0,963), свидетельствуя в пользу гомоскедастичности (постоянства дисперсии остатков) и, соответственно, эффективности (надёжности) оценок параметров регрессии. Значимым оказался лишь коэффициент корреляции Спирмена между модулями остатков модели 7 и индексом Северо-Атлантического колебания ( $p$ -value = 0,028), а также между ними и рассчитанной по этой модели функцией отклика ( $p$ -value = 0,033), что может указывать на наличие гетероскедастичности в модели 7 по отношению к wNAO и на возможную неэффективность (малую надёжность) оценки коэффициента регрессии при этом предикторе, на что в дальнейшем

следует обратить внимание. Дополнительно, соблюдение условия гомоскедастичности проверено графическим методом: построены графики, на которых по оси ординат отложены остатки, а по оси абсцисс – время (см. рис. 7), предикторы и рассчитанная по модели зависимая переменная (графики для последних двух вариантов построены, но не показаны в целях экономии места). Судя по рис. 7, для всех четырёх моделей дисперсия их остатков постоянна – они распределены в виде равномерной полосы, параллельной оси абсцисс.

Отсутствие автокорреляции остатков проверялось с помощью критерия Дарбина-Уотсона, значения которого для моделей 4–7 изменялись от 1,51 до 1,54, что согласно [Малинин, 2008] свидетельствует о неопределённости в этом вопросе, т.е. гипотеза об отсутствии автокорреляции не может быть ни принята, ни отклонена. Поэтому для дополнительной проверки был использован Q-тест Льюнга-Бокса с количеством лагов, равным 5 (определённым как  $\ln(n)$ , где  $n = 108$ ). P-value этого теста для рассматриваемых моделей варьировал от 0,051 до 0,110, т.е. во всех случаях превышал 0,050, что не позволяет отклонить нулевую гипотезу об отсутствии автокорреляции на 5%-ном уровне значимости. Таким образом, четвёртая предпосылка метода наименьших квадратов соблюдена, что также подтверждает эффективность и состоятельность оценок коэффициентов выбранных прогностических уравнений.

Остатки всех четырёх моделей (4–7) в целом подчиняются нормальному закону распределения, что было оценено с помощью критерия Шапиро-Уилка ( $p$ -value = 0,058...0,397) и критерия согласия Колмогорова-Смирнова ( $p$ -value = 0,447...0,875). Лишь в модели 6 критерий Шапиро-Уилка указал на возможное отклонение распределения остатков от

нормального закона ( $p$ -value = 0,023). Тем не менее, учитывая оценки, полученные с помощью непараметрического критерия Колмогорова-Смирнова, можно говорить о допустимости применения t-критерия Стьюдента и F-критерия Фишера для проверки статистических гипотез о значимости уравнений регрессии и их параметров [Малинин, 2008].

Также выполнена необходимая для множественной регрессии проверка независимых переменных на отсутствие мультиколлинеарности. Критерий VIF (фактор инфляции дисперсии – мера оценки степени мультиколлинеарности в множественной регрессии) для разных предикторов в моделях 4–7 составил 1,0; 1,0–1,6; 1,0–2,6 и 1,0–1,7 соответственно, что говорит об отсутствии или слабой мультиколлинеарности, не требующей вмешательства, поскольку  $VIF < 5$ .

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в целом распределение остатков рассмотренных прогностических моделей носит случайный характер, а сами модели являются адекватными и надёжными.

Результаты оценки обеспеченности и эффективности выбранных моделей показаны в табл. 5. Для проверки оправдываемости моделей на независимой выборке период с 1916 по 2023 гг. (не с 1900 г., так как максимальный лаг одного из предикторов 16 лет) был разбит на рабочую (1916–2003 гг.) и независимую (2004–2023 гг.) выборки. Вначале на основе рабочей выборки пересчитывались коэффициенты регрессии в уравнениях 4–7, по которым затем рассчитывались прогнозы на 2004–2023 гг. с последующей проверкой их оправдываемости (см. табл. 5, рис. 8).

Обеспеченность регрессионных моделей 4–7, обозначенных в табл. 5 как M3, M4a, M4b и M5 (по количеству предикторов), при допустимой ошибке  $1\sigma$ , используемой при оценке качества сверхдолгосрочных прогнозов, оказалась на 19–22% выше обеспе-

**Таблица 5.** Оценка качества регрессионных моделей при допустимой ошибке  $1\sigma$   
**Table 5.** Quality assessment of regression models at an acceptable error of  $1\sigma$

Модель	Показатели качества модели									
	R <sup>2</sup>	p-value	Pm, %	Pn, %	ΔP, %	SE, °C	MAE, °C	MAPE, %	Pf, %	ΔF, °C
M3	0,518	<0,001	86	67	19	0,384	0,281	7,2	75	0,338
M4a	0,551	<0,001	89	67	22	0,373	0,279	7,1	80	0,243
M4b	0,543	<0,001	87	67	20	0,376	0,278	7,1	80	0,274
M5	0,569	<0,001	87	67	20	0,367	0,275	7,0	80	0,280

*Примечание:* M3, M4a, M4b и M5 – регрессионные модели, основанные на уравнениях 4, 5, 6 и 7 соответственно, включающие 3, 4 или 5 предикторов, R<sup>2</sup> – коэффициент детерминации, p-value – уровень значимости, Pm – обеспеченность модели в сравнении с обеспеченностью по норме (Pn), ΔP – эффективность модели (превышение Pm над Pn), SE – стандартная (среднеквадратическая) ошибка, MAE – средняя абсолютная ошибка, MAPE – средняя абсолютная процентная ошибка, Pf – оправдываемость прогноза на независимой выборке (2004–2023 гг., коэффициенты регрессии в этом случае пересчитывались для 1916–2003 гг.), ΔF – средняя абсолютная ошибка прогноза.

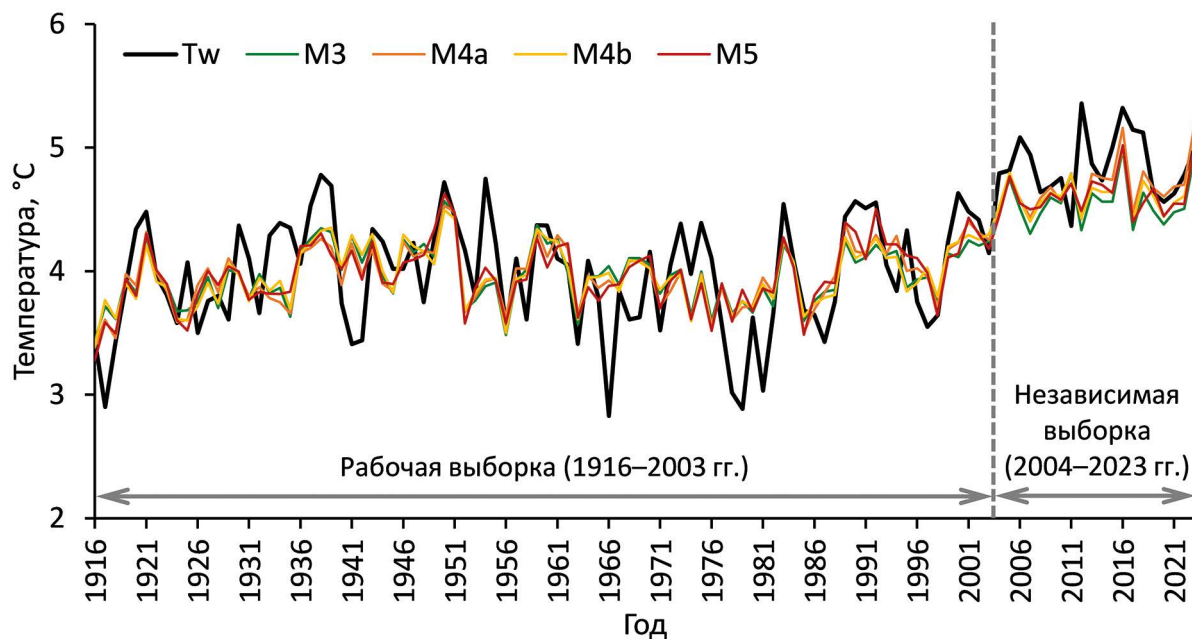


Рис. 8. Наблюдённая ( $T_w$ ) и рассчитанная по регрессионным моделям (M3, M4a, M4b, M5) температура воды на разрезе «Кольский меридиан» в 1916–2023 гг.

Fig. 8. Observed ( $T_w$ ) and calculated using regression models (M3, M4a, M4b, M5) water temperature in the Kola section in 1916–2023

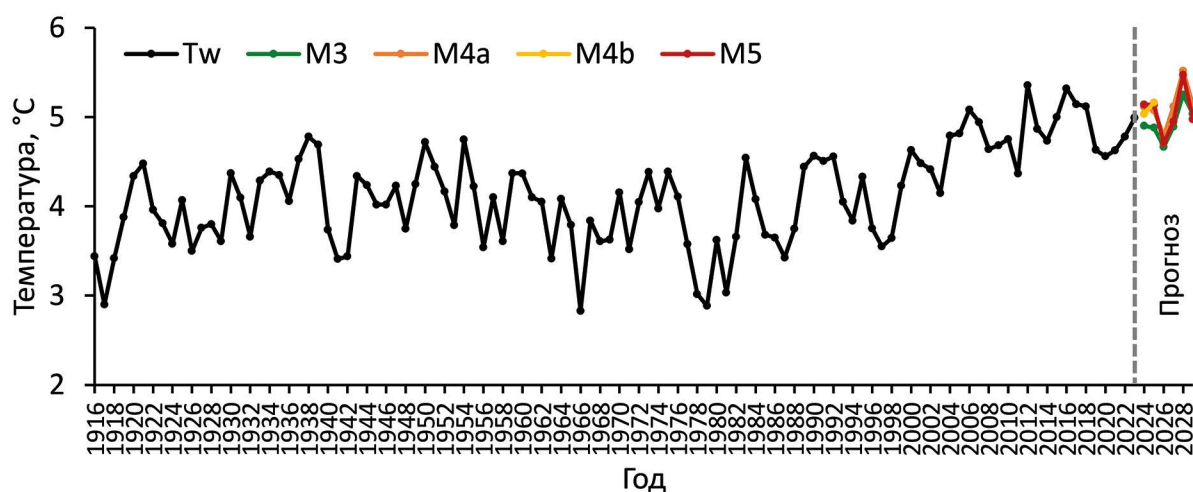
ченности прогноза по норме, что свидетельствует об их эффективности и возможности применения на практике. Среднеквадратическая ошибка составила 0,367–0,384 °C, что в 1,5 раза меньше среднеквадратического отклонения зависимой переменной (0,546 °C), т.е. указанные модели обладают предсказательной силой, поскольку лучше описывают функцию отклика, чем её среднее арифметическое значение. Средняя абсолютная ошибка варьировала незначительно (от 0,275 °C для модели M5 до 0,281 °C для модели M3), как и средняя абсолютная процентная ошибка (7,0–7,2%), величина которой говорит о хорошем качестве построенных уравнений. Лучшую оправдываемость (80%) показали модели M4a, M4b и M5, включающие в себя от 4 до 5 предикторов, с наименьшей средней абсолютной ошибкой прогноза (0,243 °C) у модели M4a, которая при описании межгодовой изменчивости температуры воды Баренцева моря учитывает адвекцию тепла течениями из Северной Атлантики (через индекс Атлантического мультideкадного колебания), интенсивность западного переноса воздушных масс в Баренцево море и атмосферную циркуляцию над ним (через зимний индекс Северо-Атлантического колебания), изменчивость инсоляции – степени нагрева за счёт солнечной радиации поверхности Земли и воздуха (через солнечную активность и широтную координату полюса Земли, связанную с наклоном оси вращения планеты).

С помощью регрессионных моделей 4–7 составлены экспериментальные прогнозы температуры атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан» на 2024–2029 гг. (табл. 6, рис. 9). Результаты по всем четырём моделям показали хорошую согласованность. Среднее абсолютное отклонение между прогнозами по моделям M4a, M4b и M5 составило около 0,1 °C. Лишь модель M3 выдала по сравнению с каждой из них заниженную (в среднем на 0,2 °C) прогнозируемую температуру. Таким образом, ориентируясь на прогнозы моделей с четырьмя и пятью предикторами, следует ожидать понижение температуры воды на разрезе до 4,7–4,8 °C в 2026 г., а затем её рост до 5,5 °C в 2028 г. (что может стать новым историческим максимумом) с последующим уменьшением в 2029 г. до уровня 2024, 2025 и 2027 гг. (около 5,0–5,1 °C). Следует особо подчеркнуть, что представленные в этом абзаце прогнозируемые значения температуры имеют допустимую погрешность  $1\sigma$ , т.е., по сути, прогноз – это не одно единственное значение, а диапазон значений (см. табл. 6).

Согласно имеющимся в нашем распоряжении сведениям о фактической температуре воды на разрезе «Кольский меридиан» за 2024 и 2025 гг., можно сказать, что её прогнозы на эти два года оправдались по всем четырём моделям (см. табл. 6), поскольку их абсолютные ошибки (0,01–0,42 °C) оказались ниже допустимой ошибки  $1\sigma$  (0,55 °C), используемой для

**Таблица 6.** Прогноз температуры воды (°C) на разрезе «Кольский меридиан» на 2024–2029 гг. по регрессионным моделям M3, M4a, M4b и M5**Table 6.** Forecast of water temperature (°C) in the Kola section for 2024–2029 using regression models M3, M4a, M4b and M5

Модель	Год					
	2024	2025	2026	2027	2028	2029
M3	4,90±0,55	4,88±0,55	4,67±0,55	4,89±0,55	5,25±0,55	5,04±0,55
M4a	5,12±0,55	5,08±0,55	4,79±0,55	5,12±0,55	5,52±0,55	5,13±0,55
M4b	5,03±0,55	5,16±0,55	–	–	–	–
M5	5,14±0,55	5,14±0,55	4,71±0,55	4,95±0,55	5,48±0,55	4,98±0,55
Факт	4,72	5,15	–	–	–	–

**Рис. 9.** Температура воды на разрезе «Кольский меридиан»: наблюдаемая в 1916–2023 гг. (Tw) и спрогнозированная на 2024–2029 гг. по регрессионным моделям (M3, M4a, M4b, M5)**Fig. 9.** Water temperature in the Kola section: observed in 1916–2023 (Tw) and predicted for 2024–2029 using regression models (M3, M4a, M4b, M5)

оценки оправдываемости морских гидрологических прогнозов с заблаговременностью более 6 месяцев<sup>8</sup>.

Обобщив результаты анализа остатков регрессионных моделей M3, M4a, M4b, M5 и проверки их качества, эффективности, оправдываемости и ошибок (табл. 7), для долгосрочного прогнозирования температуры атлантических вод в Баренцевом море рекомендуется использовать модель M4a (как наилучшую):  $T_w = 4,250 + 0,1679 \cdot wNAO_{-16} + 0,7807 \cdot AMO_{-6} - 0,001908 \cdot SN_{-7} + 3,217 \cdot Xp_{-6}$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В изменениях температуры атлантических вод в Баренцевом море с 1900 г. по настоящее время имеется значимый положительный тренд (0,08 °C за

10 лет,  $R^2 = 0,287$ ). Наиболее интенсивный её рост начался с конца 1970-х годов (0,37 °C за 10 лет,  $R^2 = 0,617$ ). Выделены четыре крупных периода: два холодных (1900–1929 и 1963–1988 гг.) и два тёплых (1930–1962 и 1989–2023 гг.). Холодные периоды были близки по статистическим показателям температуры воды, тёплые отличались – современное потепление стало более сильным, чем предыдущее.

Наибольший вклад в межгодовые изменения температуры воды Баренцева моря вносят квадратичный тренд (32,6%) и 62-летняя гармоника (13,4%), которая отвечает за чередование тёплых и холодных периодов. Найдена значимая связь температуры как с глобальными климатическими индексами ( $|r| = 0,29 - 0,65$ ), так и с астроголофизическими факторами ( $|r| = 0,19 - 0,59$ ).

Построены четыре регрессионные модели для прогноза температуры воды Баренцева моря с заблаговременностью 2 года и 6 лет. Для использова-

<sup>8</sup> РД 52.27.759-2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов (введён в действие Приказом Росгидромета от 24.02.2012 № 112).

**Таблица 7.** Ранги регрессионных моделей М3, М4а, М4б и М5 по результатам проверки их качества (1 – лучшая модель, 4 – худшая модель)

**Table 7.** Ranks of regression models М3, М4а, М4б and М5 based on the results of their quality testing (1 – best model, 4 – worst model)

Критерий проверки качества модели	Модель			
	М3	М4а	М4б	М5
1-я предпосылка метода наименьших квадратов (МНК)	2,5	2,5	2,5	2,5
2-я предпосылка МНК (на основе коэффициентов корреляции Пирсона и Спирмена)	3	3	3	1
3-я предпосылка МНК	1	2	3	4*
4-я предпосылка МНК (на основе критерия Дарбина-Уотсона и Q-теста Льюнга-Бокса)	3,5	1,5	3,5	1,5
5-я предпосылка МНК (на основе критериев Шапиро-Уилка и Колмогорова-Смирнова)	3	1,5	4**	1,5
Проверка предикторов на мультиколлинеарность (на основе критерия VIF)	1	2	4	3
Коэффициент детерминации модели (с учётом числа степеней свободы)	4	2	3	1
Значимость коэффициентов регрессии (для выборок за 1916–2003 и 1916–2023 гг.)	1	2	3,5***	3,5***
Эффективность модели (ΔP)	4	1	2,5	2,5
Ошибки модели (SE, MAE, MAPE)	4	2,5	2,5	1
Оправдываемость модели на независимой выборке (Pf)	4	2	2	2
Ошибка прогноза на независимой выборке (ΔF)	4	1	2	3
Среднее значение	2,9	1,9	3,0	2,2
Итоговый ранг	3	1	4	2

Примечание: \* – тест на соблюдение условия гомоскедастичности провален, \*\* – тест на нормальность распределения остатков модели по критерию Шапиро-Уилка провален, \*\*\* – для выборки за 1916–2003 гг. отдельные коэффициенты регрессии оказались незначимыми.

ния на практике выбрана наиболее адекватная и надёжная модель, включающая зимний индекс Северо-Атлантического колебания (вклад в изменчивость температуры 11%), индекс Атлантического мультискального колебания (28%), солнечную активность (5%) и X-координату полюса Земли (11%).

Согласно составленным экспериментальным прогнозам температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» на 2024–2029 гг., ожидается её понижение до 4,8 °С в 2026 г., затем рост до 5,5 °С в 2028 г. с последующим уменьшением в 2029 г. до уровня 2024, 2025 и 2027 гг. (5,1 °С) при допустимой ошибке 0,55 °С.

### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы соблюдены.

### Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Полярного филиала ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М.Книповича).

### ЛИТЕРАТУРА

- Аверкиев А. С., Густов Д. В., Карпова И. П., Серяков Е. И. 2005. Исследование и долгосрочное прогнозирование тепловых процессов на разрезе «Кольский меридиан» // 100 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море: сборник докладов международного симпозиума. Мурманск: Изд-во ПИНРО. С. 15–31.
- Бойцов В. Д. 2007. Космогеофизические факторы и межгодовые колебания температуры воды Баренцева моря // Рыбное хозяйство. № 1. С. 57–60.
- Бойцов В. Д., Гузенко В. В. 2021. Сравнительный анализ межгодовой изменчивости температуры воды поверхности юго-западной части Баренцева моря и на разрезе «Кольский меридиан» // Труды ВНИРО. Т. 186. № 4. С. 119–131. DOI: 10.36038/2307-3497-2021-186-119-131.

- Бойцов В.Д., Карсаков А.Л., Аверкиев А.А., Густоев Д.В., Карпова И.П. 2010. Исследование изменчивости гидрофизических характеристик по наблюдениям на разрезе «Кольский меридиан» // Учёные записки Российского государственного гидрометеорологического университета. № 15. С. 135–149.
- Бородич С.А. 2000. Вводный курс эконометрики. Минск: БГУ. 354 с.
- Бочков Ю.А. 1978. Учёт 11-летних колебаний солнечной активности в фоновых прогнозах температуры воды Баренцева моря // Труды ПИНРО. Вып. 40. С. 33–43.
- Бочков Ю.А. 1979. Сверхдолгосрочные прогнозы температуры воды разреза «Кольский меридиан» // Методические рекомендации по прогнозированию температуры воды в Северном рыбопромысловом бассейне. Мурманск: Изд-во ПИНРО. С. 125–164.
- Бочков Ю.А. 1982. Ретроспектива температуры воды в слое 0–200 м на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море (1900–1981 гг.) // Труды ПИНРО. Вып. 46. С. 113–122.
- Бочков Ю.А. 2005. Крупномасштабные колебания температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» и их прогнозирование // 100 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море: сборник докладов международного симпозиума. Мурманск: Изд-во ПИНРО. С. 47–64.
- Бочков Ю.А., Саруханян Э.И., Смирнов Н.П. 1968. Основные закономерности многолетних колебаний температуры воды Баренцева моря и их связь с геофизическими процессами // Труды ПИНРО. Вып. 23. С. 104–115.
- Воробьев В.Н., Саруханян Э.И., Смирнов Н.П. 2006. Лунный нодальный (деклинационный) прилив и его возможное влияние на циркуляцию атмосферы // Учёные записки Российского государственного гидрометеорологического университета. № 2. С. 7–19.
- Вязигина Н.А., Тимохов Л.А., Егорова Е.С., Юлин А.В. 2021. Информативность гидрометеорологических и астрогеофизических факторов в задаче описания межгодовых колебаний ледовитости Гренландского моря // Лёд и Снег. Т. 61. № 3. С. 431–444. DOI: 10.31857/S2076673421030099.
- Герман Дж.Р., Голдберг Р.А. 1981. Солнце, погода и климат. Пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат. 319 с.
- Гершанович Д.Е., Муромцев А.М. 1983. Океанологические основы биологической продуктивности Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат. 320 с.
- Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М., Фролов И.Е. 2009. О характере и причинах изменений климата Земли // Проблемы Арктики и Антарктики. № 81. С. 15–23.
- Елисеева И.И., Юзбашев М.М. 2004. Общая теория статистики. М.: Финансы и статистика. 656 с.
- Ижевский Г.К. 1961. Океанологические основы формирования промысловой продуктивности морей. М.: Пищепромиздат. 215 с.
- Карпова И.П., Сустанов Ю.В., Николаев Д.Л. 1989. Использование приёмов экстраполяции временных рядов в методах сверхдолгосрочного прогнозирования // Методы расчёта и прогноза гидрометеорологических процессов в промысловых районах. Л.: ЛГМИ. Вып. 112. С. 22–35.
- Карсаков А.Л., Трофимов А.Г., Анциферов М.Ю., Ившин В.А., Губанищев М.А. 2022. 120 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан». Мурманск: ПИНРО им. Н.М.Книповича. 145 с.
- Кисляков А.Г. 1968. О связи термики вод Норвежского и Нордкапского течений // Труды ПИНРО. Вып. 23. С. 143–156.
- Коросов А.В., Горбач В.В. 2007. Компьютерная обработка биологических данных. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ. 76 с.
- Лис Н.А., Чернявская Е.А., Миронов Е.У., Тимохов Л.А., Егорова Е.С. 2023. Информативность факторов, формирующих долгопериодные колебания ледовитости отдельных районов Баренцева моря // Российская Арктика. Т. 5. № 2. С. 17–32. DOI: 10.24412/2658-4255-2023-2-17-32.
- Максимов И.В., Смирнов Н.П. 1967. Генетический метод прогноза многолетних колебаний климатических характеристик в океане // Труды ПИНРО. Вып. 20. С. 323–335.
- Малинин В.Н. 2008. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ. 408 с.
- Малинин В.Н. 2020. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Том 2. Анализ временных рядов и случайных полей. СПб.: РГГМУ. 196 с.
- Методические рекомендации по прогнозированию температуры воды в Северном рыбопромысловом бассейне. 1979. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 173 с.
- Методические рекомендации по статистико-вероятностному прогнозированию океанологических характеристик. 1989. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 90 с.
- Методические рекомендации по использованию метода сверхдолгосрочного прогнозирования гидрометеорологических элементов (МСПГЭ) и программного комплекса «Призма». 1997. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 40 с.
- Ожигин В.К., Ившин В.А., Трофимов А.Г., Карсаков А.Л., Анциферов М.Ю. 2016. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 260 с.
- Ожигин В.К., Третьяк В.Л., Ярагина Н.А., Ившин В.А. 1999. Океанографические условия Баренцева моря и их влияние на выживание и развитие молоди северо-восточной арктической трески. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 88 с.
- Протасов Ю.М., Юров В.М. 2016. Гармонический анализ периодических колебаний объёмов продаж компании на основе инструмента «регрессия» MS EXCEL // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Экономика. № 2. С. 115–121. DOI: 10.18384/2310-6646-2016-2-115-121.
- Смирнов Н.П., Саруханян Э.И., Бочков Ю.А. 1967. Многолетние колебания гидрологического режима Баренцева и Норвежского морей и возможности их прогнозирования // Материалы рыбохозяйственных исследований Северного бассейна. Вып. 8. С. 111–121.
- Сустанов Ю.В. 1978. Физико-статистическая модель изменчивости температуры воды Баренцева моря и метод

- расчёта и прогноза её компонент // Труды ГОИН. Вып. 147. С. 34–44.
- Тимохов Л.А., Вязигина Н.А., Миронов Е.У., Юлин А.В. 2019. Климатические изменения сезонных и долгопериодных колебаний ледовитости Гренландского и Баренцева морей // Проблемы Арктики и Антарктики. Т. 65. № 2. С. 148–168. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-148-168.
- Трофимов А. Г., Губанищев М.А., Анциферов М.Ю., Прокопчук И.П., Манушин И.Е., Стрелкова Н.А., Брыкина А.С., Вязникова В.С., Новиков М.А., Горбачева Е.А. 2025. Гидрохимические, гидробиологические и экотоксикологические исследования на разрезе «Кольский меридиан». Мурманск: «ПИНРО» им. Н.М.Книповича. 204 с.
- Трофимов А.Г., Карсаков А.Л., Ившин В.А. 2018. Изменения климата в Баренцевом море на протяжении последнего полувека // Труды ВНИРО. Т. 173. С. 79–91. DOI: 10.36038/2307-3497-2018-173-79-91.
- Шевченко А.В. 2000. Океанологические условия формирования промысловой продуктивности в морях Северо-Европейского бассейна. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 100 с.
- Boitsov V.D., Karsakov A.L., Trofimov A.G. 2012. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000–2009 // ICES Journal of Marine Science. V. 69. № 5. P. 833–840. DOI: 10.1093/icesjms/fss075.
- Dalpadado P., Arrigo K.R., Hjøllø S.S., Rey F., Ingvaldsen R.B., Sperfeld E., van Dijken G.L., Stige L.C., Olsen A., Ottersen G. 2014. Productivity in the Barents Sea – response to recent climate variability // PLoS ONE. V. 9. № 5. Art. e95273. DOI: 10.1371/journal.pone.0095273.
- González-Pola C., Larsen K.M.H., Fratantoni P., Beszczynska-Möller A. (Eds.). 2020. ICES Report on Ocean Climate 2019 // ICES Cooperative Research Report. № 350. 136 pp. DOI: 10.17895/ices.pub.7537.
- Ingvaldsen R., Loeng H., Ottersen G., Ådlandsvik B. 2003. Climate variability in the Barents Sea during the 20th century with a focus on the 1990s // ICES Marine Science Symposia. V. 219. P. 160–168.
- Ingvaldsen R.B., Asplin L., Loeng H. 2004. The seasonal cycle in the Atlantic transport to the Barents Sea during the years 1997–2001 // Continental Shelf Research. V. 24. № 9. P. 1015–1032. DOI: 10.1016/j.csr.2004.02.011.
- Jakobsen T., Ozhigin V.K. (Eds.). 2011. The Barents Sea: ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation. Trondheim: Tapir Academic Press. 825 pp.
- Loeng H., Blindheim J., Ådlandsvik B., Ottersen G. 1992. Climatic variability in the Norwegian and Barents Seas // ICES Marine Science Symposium. V. 195. P. 52–61.
- Loeng H., Drinkwater K. 2007. An overview of the ecosystems of the Barents and Norwegian Seas and their response to climate variability // Deep-Sea Research II. V. 54. № 23–26. P. 2478–2500. DOI: 10.1016/j.dsr2.2007.08.013.
- Maslowski W., Marble D., Walczowski W., Schauer U., Clement J.L., Semtner A.J. 2004. On climatological mass, heat, and salt transports through the Barents Sea and Fram Strait from a pan-Arctic coupled ice-ocean model simulation // Journal of Geophysical Research. V. 109. Art. C03032. DOI: 10.1029/2001JC001039.
- Ottersen G., Ådlandsvik B., Loeng H. 2000. Predicting the temperature of the Barents Sea // Fisheries Oceanography. V. 9. Iss. 2. P. 121–135. DOI: 10.1046/j.1365-2419.2000.0127.x.
- Ottersen G., Ådlandsvik B., Loeng H. 2005. The Kola section – an indicator of Barents Sea climate // 100 years of oceanographic observations along the Kola section in the Barents Sea. Papers of the intern.l symp. Murmansk: PINRO Press. P. 236–251.

## REFERENCES

- Averkiev A.S., Gustoev D.V., Karpova I.P., Seryakov E.I. 2005. Investigations and forecasting of long-term temperature variations in the Kola section // 100 years of oceanographic observations along the Kola section in the Barents Sea: Papers of the intern. symp. Murmansk: PINRO Publish. P. 15–31. (In Russ.).
- Boitsov V.D. 2007. Cosmogeophysic factors and year-to-year variations in the Barents Sea temperature // Fisheries Journal. № 1. P. 57–60. (In Russ.).
- Boitsov V.D., Guzenko V.V. 2021. Comparative analysis of interannual variability of water temperature on the surface of the southwestern part of the Barents Sea and on the Kola Section // Trudy VNIRO. V. 186. № 4. P. 119–131. DOI: 10.36038/2307-3497-2021-186-119-131. (In Russ.).
- Boitsov V.D., Karsakov A.L., Averkiev A.S., Gustoev D.V., Karpova I.P. 2010. Study of hydrophysical characteristic variability based on observations from the Kola section // Proc. of the Russian State Hydrometeorological University. № 15. P. 135–149. (In Russ.).
- Borodich S.A. 2000. Introductory course in econometrics. Minsk: BSU. 354 pp. (In Russ.).
- Bochkov Yu.A. 1978. Allowance for 11-year variations of solar activity in forecasting of the Barents Sea water temperature // Trudy PINRO. № 40. P. 33–43. (In Russ.).
- Bochkov Yu.A. 1979. Ultra-long-term forecasts of water temperature in the Kola section // Methodological recommendations on forecasting water temperature in the Northern Fisheries Basin. Murmansk: PINRO Publish. P. 125–164. (In Russ.).
- Bochkov Yu.A. 1982. Water temperature in the 0–200 m layer in the Kola section in the Barents Sea, 1900–1981 // Trudy PINRO. № 46. P. 113–122. (In Russ.).
- Bochkov Yu.A. 2005. Large-scale variations in water temperature in the Kola section and their forecasting // 100 years of oceanographic observations along the Kola section in the Barents Sea: Papers of the intern. symp. Murmansk: PINRO Publish. P. 47–64. (In Russ.).
- Bochkov Yu.A., Sarukhanyan E.I., Smirnov N.P. 1968. Major regularities of long-term variations in water temperature of the Barents Sea and their link with geophysical processes // Trudy PINRO. № 23. P. 104–115. (In Russ.).
- Vorobyev V.N., Sarukhanyan E.I., Smirnov N.P. 2006. The Moon nodal (declination) tide and its possible effect on the

- atmospheric circulation // Proc. of the Russian State Hydrometeorological University. № 2. P. 7–19. (In Russ.).
- Viazigina N.A., Timokhov L.A., Egorova E.S., Yulin A.V. 2021. Informativeness (information-bearing) of hydrometeorological and astrogeophysical factors in the problem of describing interannual fluctuations of the Greenland Sea ice coverage // Ice and Snow. V. 61. № 3. P. 431–444. doi:10.31857/S2076673421030099. (In Russ.).
- Herman J.R., Goldberg R.A. 1981. Sun, weather, and climate. Leningrad: Gidrometeoizdat. 319 pp. (In Russ.).
- Gershanovich D.E., Muromtsev A.M. 1983. Oceanological bases of biological productivity of the World Ocean. Leningrad: Gidrometeoizdat. 320 pp. (In Russ.).
- Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Smolyanitsky V.M., Frolov I.E. 2009. On the character and causes of the Earth's climate changes // Arctic and Antarctic Research. № 81. P. 15–23. (In Russ.).
- Eliseeva I.I., Yuzbashev M.M. 2004. General theory of statistics. Moscow: Finansy i Statistika. 656 pp. (In Russ.).
- Izhevsky G.K. 1961. Oceanological bases of forming commercial productivity of the seas. Moscow: Pishchepromizdat. 215 pp. (In Russ.).
- Karpova I.P., Sustavov Yu.V., Nikolaev D.L. 1989. The use of time series extrapolation technique in methods of super long-term forecast // Methods of calculation and forecast of hydrometeorological processes in the fishing areas. Leningrad: LSML. № 112. P. 22–35. (In Russ.).
- Karsakov A.L., Trofimov A.G., Antsiferov M.Yu., Ivshin V.A., Gubanishchev M.A. 2022. 120 years of oceanographic observations along the Kola Section. Murmansk: PINRO Publish. 145 pp. (In Russ.).
- Kislyakov A.G. 1968. On relationship between temperatures of Norwegian and North Cape currents // Trudy PINRO. № 23. P. 143–156. (In Russ.).
- Korosov A.V., Gorbach V.V. 2007. Computer processing of biological data. Petrozavodsk: PetrGU Press. 76 pp. (In Russ.).
- Lis N.A., Cherniavskaya E.A., Mironov E.U., Timokhov L.A., Egorova E.S. 2023. Informativeness (information-bearing) of factors forming interannual variability of the Barents Sea and its individual areas ice cover // Russian Arctic. V. 5. № 2. P. 17–32. DOI: 10.24412/2658-4255-2023-2-17-32. (In Russ.).
- Maximov I.V., Smirnov N.P. 1967. Genetic method for predicting the long-term variations of climatic properties in the ocean // Trudy PINRO. № 20. P. 323–335. (In Russ.).
- Malinin V.N. 2008. Statistical methods for analyzing hydrometeorological information. Saint Petersburg: RSGMU. 408 pp. (In Russ.).
- Malinin V.N. 2020. Statistical methods for analyzing hydrometeorological information. Volume 2. Analysis of temporal series and random fields. Saint Petersburg: RSGMU. 196 pp. (In Russ.).
- Methodical recommendations on forecasting of water temperature in the Northern Fisheries Basin. 1979. Murmansk: PINRO Publish. 173 pp. (In Russ.).
- Methodical recommendations on statistical forecasting of oceanographic characteristics. 1989. Murmansk: PINRO Publish. 90 pp. (In Russ.).
- Methodical recommendations on the use of a super long forecasting method of hydrometeorological parameters (SLFMHP) and a software package «Prizma». 1997. Murmansk: PINRO Publish. 40 pp. (In Russ.).
- Ozhigin V.K., Ivshin V.A., Trofimov A.G., Karsakov A.L., Antsiferov M.Yu. 2016. The Barents Sea waters: structure, circulation, variability. Murmansk: PINRO Publish. 260 pp. (In Russ.).
- Ozhigin V.K., Tretyak V.L., Yaragina N.A., Ivshin V.A. 1999. The Barents Sea oceanographic conditions and their impact on the survival and development of juvenile Northeast Arctic cod. Murmansk: PINRO Publish. 88 pp. (In Russ.).
- Protasov Yu.M., Yurov V.M. 2016. The harmonic analysis of periodic fluctuations in sales volumes of the company by means of «Regression» MS Excel tool // Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Economics. № 2. P. 115–121. DOI: 10.18384/2310-6646-2016-2-115-121. (In Russ.).
- Smirnov N.P., Sarukhanyan E.I., Bochkov Yu.A. 1967. Long-term variations in hydrographic regime of the Barents and Norwegian seas and possibilities of their forecasting // Materials of fisheries investigations in the Northern Basin. № 8. P. 111–121. (In Russ.).
- Sustavov Yu.V. 1978. Physical and statistical model of water temperature variability in the Barents Sea and a method of calculation and prediction of its components // Trudy GOIN. № 147. P. 34–44. (In Russ.).
- Timokhov L.A., Vyazigina N.A., Mironov E.U., Yulin A.V. 2019. Climatic changes of seasonal and inter-annual variability of the ice cover of the Greenland and Barents Seas // Arctic and Antarctic Research. V. 65. № 2. P. 148–168. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-148-168. (In Russ.).
- Trofimov A.G., Gubanishchev M.A., Antsiferov M.Yu., Prokopchuk I.P., Manushin I.E., Strelkova N.A., Brykina A.S., Vyaznikova V.S., Novikov M.A., Gorbacheva E.A. 2025. Hydrochemical, hydrobiological and ecotoxicological studies in the Kola Section. Murmansk: PINRO Publish. 204 pp. (In Russ.).
- Trofimov A.G., Karsakov A.L., Ivshin V.A. 2018. Climate changes in the Barents Sea over the last half century // Trudy VNIRO. V. 173. P. 79–91. DOI: 10.36038/2307-3497-2018-173-79-91. (In Russ.).
- Shevchenko A.V. 2000. Oceanological conditions for forming commercial productivity in the seas of the North European basin. Murmansk: PINRO Publish. 100 pp. (In Russ.).
- Boitsov V.D., Karsakov A.L., Trofimov A.G. 2012. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000–2009 // ICES Journal of Marine Science. V. 69. № 5. P. 833–840. DOI: 10.1093/icesjms/fss075.
- Dalpadado P., Arrigo K.R., Hjelto S.S., Rey F., Ingvaldsen R.B., Sperfeld E., van Dijken G.L., Stige L.C., Olsen A., Ottersen G. 2014. Productivity in the Barents Sea – response to recent

- climate variability // PLoS ONE. V. 9. № 5. Art. e95273. DOI: 10.1371/journal.pone.0095273.
- González-Pola C., Larsen K. M. H., Fratantoni P., Beszczynska-Möller A. (Eds.). 2020. ICES Report on Ocean Climate 2019 // ICES Cooperative Research Report. № 350. 136 pp. DOI: 10.17895/ices.pub.7537.
- Ingvaldsen R., Loeng H., Ottersen G., Ådlandsvik B. 2003. Climate variability in the Barents Sea during the 20th century with a focus on the 1990s // ICES Marine Science Symposia. V. 219. P. 160–168.
- Ingvaldsen R. B., Asplin L., Loeng H. 2004. The seasonal cycle in the Atlantic transport to the Barents Sea during the years 1997–2001 // Continental Shelf Research. V. 24. № 9. P. 1015–1032. DOI: 10.1016/j.csr.2004.02.011.
- Jakobsen T., Ozhigin V. K. (Eds.). 2011. The Barents Sea: ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation. Trondheim: Tapir Academic Press. 825 pp.
- Loeng H., Blindheim J., Ådlandsvik B., Ottersen G. 1992. Climatic variability in the Norwegian and Barents Seas // ICES Marine Science Symposium. V. 195. P. 52–61.
- Loeng H., Drinkwater K. 2007. An overview of the ecosystems of the Barents and Norwegian Seas and their response to climate variability // Deep-Sea Research II. V. 54. № 23–26. P. 2478–2500. DOI: 10.1016/j.dsr2.2007.08.013.
- Maslowski W., Marble D., Walczowski W., Schauer U., Clement J. L., Semtner A. J. 2004. On climatological mass, heat, and salt transports through the Barents Sea and Fram Strait from a pan-Arctic coupled ice-ocean model simulation // Journal of Geophysical Research. V. 109. Art. C03032. DOI: 10.1029/2001JC001039.
- Ottersen G., Ådlandsvik B., Loeng H. 2000. Predicting the temperature of the Barents Sea // Fisheries Oceanography. V. 9. Iss. 2. P. 121–135. DOI: 10.1046/j.1365-2419.2000.00127.x.
- Ottersen G., Ådlandsvik B., Loeng H. 2005. The Kola section – an indicator of Barents Sea climate // 100 years of oceanographic observations along the Kola section in the Barents Sea. Papers of the intern.l symp. Murmansk: PINRO Press. P. 236–251.

Поступила в редакцию 17.02.2026 г.  
Принята после рецензий 31.03.2026 г.