УДК 551.465.63(261.24+261.26)«1900/2020» doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-236-254

# Долгопериодная изменчивость температуры поверхности Северного и Балтийского морей в 1900—2020 гг.

# В.Д. Бойцов

Новгородский филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» (НовгородНИРО), Великий Новгород, vboitsovd@mail.ru

В многолетних колебаниях годовой температуры поверхности Северного и Балтийского морей (SST) в 1900—2020 гг. выявлены нелинейный тренд и квазивековой цикл 70—75 лет, суммарный вклад которых в дисперсию исходных данных составляет 41 и 40 % соответственно. В изменчивости ТПО Северной Атлантики также присутствует тренд и 70-летняя циклическая компонента атлантическая мультидекадная осцилляция (AMO). Сумма этих компонент имеет высокую статистическую связь (r > 0,90) с суммой аналогичных компонент Северного моря при их синхронном сопоставлении, тогда как с Балтийским морем она максимальна при сдвиге значений температуры воды последнего на 3 года вперед. Процесс современного потепления водных масс в 1988—2020 гг. интенсивнее протекал на акватории Балтийского моря, чем Северного. Особенностью пространственного распределения скорости роста температуры является то, что в первом море она увеличивалась с юга на север и с запада на восток, тогда как во втором хорошо выраженные пространственные различия этого показателя отсутствовали.

*Ключевые слова*: Балтика, Северная Атлантика, температура поверхности моря, тренд, атлантическая мультидекадная осцилляция, потепление, климат.

# Long-term variability of the sea surface temperature (SST) in the North and Baltic Seas for the 1900—2020

# V.D. Boitsov

Novgorod Branch of the Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography (NovgorodNIRO), Veliky Novgorod, Russia

A non-linear trend and a 70—75-year cycle have been derived from the frequency composition of the annual sea surface temperature (SST) variability in the North and Baltic Seas during 1900—2020. Their total contribution to the variance of the initial data is 41 % and 40 %, respectively. The SST dynamic in the North Atlantic also contains the long-term components: a second-degree trend and a component with a period of about 70 years (Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO). Correlation analysis has shown a high statistical relationship (r > 0,90) between these three samples representing the sum of the two low-frequency components' values. At the same time, the largest value of the relationship between the SST of the North Atlantic and the North Sea has been obtained with no time lag, and with the 3-year shift of SST for the Baltic Sea. This alows to develop a methodology for long-term forecasting of dynamics of climate components of the Baltic's SST.

The recent steady warming of the North and Baltic Seas waters has started since 1988. The average positive sea surface temperature anomalies from the norm for 1961—1990 reached 0.70 and 0.80 °C respectively over a 33-year period. In the North Sea, the temperature increased by 0.31 °C above the norm

every 10 years and by 0.40 °C for the Baltic Sea. The 2014—2020 period represented the warmest period for these seas with the average temperatures of 1.2°C and 1.4°C above the norm for the North and the Baltic Seas, respectively. Consequently, the recent warming of water masses was more intense in the Baltic Sea in 1988—2020, the highest rate of temperature rise (0.51 °C/10 years) being noted in the central part of the shallow Gulf of Finland. A distinctive feature of the spatial distribution of the rate of water temperature rise is that it increased from south to north and from west to east in the Baltic Sea, while there were no well-pronounced spatial changes of this indicator in the North Sea.

Keywords: Baltic, North Atlantic, SST, trend, AMO, warming, climate.

**For citation:** *V.D. Boitsov.* Long-term variability of the sea surface temperature (SST) in the North and Baltic Seas for the 1900—2020. *Gidrometeorologiya i Ekologiya.* Journal of Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2021. 63: 236—254. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-236-254

#### Введение

Северное и Балтийское моря относятся к бассейну Атлантического океана. Однако, если первое имеет свободный водообмен с его северо-восточной частью, то адвекция атлантических вод на акваторию второго сильно ограничена из-за многочисленных островов Датских проливов. Кроме того, Балтийское море является внутриматериковым, поскольку далеко вдается в сушу, располагаясь между Скандинавским полуостровом и берегами Северо-Западной Европы. Эти различия определяют особенности океанографического режима морей.

Температура воды является одним из основных индикаторов климата океанов и морей, для исследования изменчивости которого необходимо иметь длительные ряды этого параметра. Мы не располагали данными инструментальных наблюдений за этой характеристикой вод Северного и Балтийского морей продолжительностью, необходимой для надежных оценок изменчивости теплового состояния их водных масс в низкочастотном диапазоне спектра.

Однако такая возможность существует, если использовать выборки температуры поверхности океанов и морей (SST) длительностью более 100 лет из массива «Расширенные реконструированные глобальные данные о температуре поверхности моря на основе данных COADS» архива реанализа ERSST. Он представляет собой выборки, которые были получены в результате обработки несколькими методами ранее измеренной температуры разными приборами и способами [1—3]. Наличие базы этих данных позволяет проводить анализ особенностей пространственно-временной изменчивости температуры верхнего слоя морей и океанов даже для тех акваторий, где не выполнялись длительные и регулярные инструментальные наблюдения за этим важным физическим параметром состояния водных масс.

С начала текущего столетия данные реанализа температуры поверхности вод Северного и Балтийского море (SST) стали использоваться при исследовании ее межгодовой и многолетней динамики. В работе [4] показано, что по результатам расчета трендовых компонент этой характеристики за 1982—2006 гг. скорость роста температуры в Балтийском море была больше, чем в Северном. При этом темпы ее повышения в них намного превышали уровень потепления вод многих других морей. В некоторых работах темпы современного потепления водных масс

Балтийского моря анализировались не только для всей его акватории, но и для отдельных районов за различные периоды и сезоны [5—8].

Наиболее длительные ряды данных реанализа при исследовании закономерностей изменчивости SST Балтийского моря были использованы в работе [9], где представлены оценки трендовой скорости ее увеличения за период с 1856 по 2005 г. как для всего моря, так и для его крупных районов. При этом анализ проводился по данным средней годовой температуры, а также для зимнего и летнего сезонов. В этой статье дается оценка степени сопряженности SST Балтийского моря с температурой воздуха, а также с индексами Атлантической мультидекадной осцилляции (AMO) и Североатлантического колебания (CAK).

Целью настоящей работы являлось исследование особенностей многолетних колебаний SST Северного и Балтийского морей за 1900—2020 гг. При этом решались следующие основные задачи:

 сравнительная оценка частотной структуры межгодовых колебаний поверхностной температуры морей;

 определение факторов, которые могут генерировать долгопериодные компоненты в динамике температуры воды;

выявление продолжительных фаз потепления и похолодания водных масс;

— оценка средней скорости увеличения температуры воды морей, а также на отдельных участках их акваторий в период современного потепления вод до 2020 г. включительно.

При успешном решении поставленных задач полученные результаты могут быть использованы при изучении процессов взаимодействия морских вод и атмосферы, закономерностей изменчивости климата, а также при исследовании функционирования экосистем Северного и Балтийского морей под воздействием абиотических факторов с целью длительного использования их биологических ресурсов.

#### Материалы и методы

Анализ межгодовой изменчивости температуры поверхности воды Северного и Балтийского морей в 1900—2020 гг. проводился по данным ее годовых значений, осредненных в трапециях площадью 2×2° по долготе и широте и отнесенных к их центрам. Они взяты из архива NOAA NCDC ERSST и являются последней на время подготовки работы версии 5 (https://iridl.ldeo.columbia.edu/ SOURCES/). Анализ SST Северного моря проводится по данным 13, а для Балтийского моря — 11 узлов регулярной сетки (рис. 1). Ботнический залив Балтики в работе не рассматривался, поскольку при его большой протяженности в 670 км данные температуры воды имеются только для двух узлов, что недостаточно для репрезентативной оценки особенностей ее временной изменчивости для всей его акватории.

В работе также анализировалась средняя годовая температура поверхности Северной Атлантики (ТПО) за 1900—2020 гг., рассчитанная нами по месячным данным в узлах сетки  $5 \times 5^{\circ}$  для акватории между экватором и 70° с.ш., данные которой представлены на сайте (http://www.psl.noaa.gov/data/timeseries/AMO/).



Рис. 1. Положение центров трапеций регулярной сетки 2×2° SST и метеорологических станций Северного и Балтийского морей.

Fig. 1. The location of the trapeziums centers of the 2×2° regular grid for the TV and meteorological stations in the North and Baltic seas.

Для оценки влияния крупномасштабной циркуляции воздушных масс на долгопериодные вариации SST Северного и Балтийского морей, доминирующим элементом которой является господствующий в тропосфере зональный перенос циклонами теплого и влажного воздуха с Северной Атлантики в восточном направлении, использовались средние за декабрь—февраль индексы САК за 1900—2020 гг., полученные с сайта https://www.cpc.ncep.noaa.gov/.

Дополнительно для исследования динамики годовой температуры воздуха Северного моря анализировались данные прибрежных метеорологических станций Дайс, Утсира, Дарем, Де Билт, Эмден-Хафен, а Балтийского моря — Хаммер Одде Фур, Висбу, Вилсанди, Таллин, Санкт-Петербург (см. рис. 1), которые находятся на сайте (https://data.giss.nasa.gov/gistemp/). При наличии в отдельные годы на станции пропусков в рядах температуры проводилось ее восстановление с помощью регрессионных уравнений в случае высокой корреляционной связи с данными ближайших пунктов наблюдений.

Анализ выборок на наличие линейного и нелинейного трендов, низкочастотных циклических компонент, расчеты коэффициентов корреляции, детерминации, регрессии и статистических характеристик проводился с помощью пакета MS Excel 2009. Их статистическая значимость оценивалась по критерию Стьюдента с уровнем доверительной вероятности  $\gamma = 0.95$ . Климатические нормы анализируемых характеристик согласно рекомендациям Всемирной метеорологической организации вычислялись для периода с 1961 по 1990 г. Скорость роста температуры воды за каждые 10 лет определялась по величине коэффициента *b* уравнения линейного тренда с оценкой его значимости. Спектральный анализ временных рядов был выполнен с помощью программного комплекса AutoSignal [10].

#### Результаты исследований

При наличии в изменчивости температуры воздуха и воды за многолетний период трендовой компоненты ее обычно оценивают в виде линейной функции.

Однако она может быть частью циклической составляющей, средний период которой превышает длину исходного ряда, поэтому оценка ее параметрами нелинейной функции является более точной [11]. В настоящей работе при исследовании структуры колебаний годовой температуры поверхности Северного и Балтийского морей аппроксимация трендовой компоненты проводилась полиномом 2-й степени.

Расчет нелинейного тренда по данным за 1900—2020 гг., полученным в результате осреднения температуры всех узлов Северного моря показал, что его вклад в дисперсию исходной выборки составил 30 %, а Балтийского моря — 31 % (рис. 2), т. е. значения этого показателя оказались практически одинаковыми и являются статистически значимыми, поскольку превышают критическое значение  $R_{\rm err}^2$  (0,06) при длине выборки 121 и доверительной вероятности 0,95.

<sup>му</sup> В Северном море температура воды в 1900—2020 гг. в течение каждого десятилетия увеличивалась за счет тренда в среднем на 0,07 °C / 10 лет, а в Балтийском на 0,12 °C / 10 лет, что больше в 1,7 раза. Следует также отметить, что величина дисперсии исходных данных температуры Балтийского моря за 1900—2020 гг. также превышает этот показатель Северного моря в 1,9 раза.

Выявленные некоторые различия значений вклада нелинейных трендов в изменчивость температуры Северного и Балтийского морей по данным за 121-летний период могут быть связаны с особенностями их географического положения





*R*<sup>2</sup> — коэффициент детерминации нелинейного тренда.



 $R^2$  — nonlinear trend determination coefficient.

и крупномасштабной циркуляции воздушных и водных масс. Первое море простирается в меридиональном направлении и имеет свободный водообмен с Северо-Восточной Атлантикой, в результате которого на его акваторию осуществляется адвекция теплых и соленых водных масс системы Гольфстрим. Балтийское море вытянуто с юго-запада на северо-восток и со всех сторон окружено сушей, а приток вод атлантического генезиса из Северного моря затруднен. В периоды усиления Сибирского антициклона на акваторию Балтики происходит вторжение холодного арктического воздуха, который реже достигает акватории Северного моря. Так, наши расчеты, которые были сделаны по данным пяти метеорологических станций, расположенных на побережье каждого из морей (см. рис. 1), показали, что средняя годовая температура воздуха на побережье Северного моря за рассматриваемый период составляет 8,5 °C, а Балтийского, которое расположено восточнее, — лишь 6,8 °C. Средняя годовая температура поверхностного слоя воды первого моря (9,8 °C) на 1,7 °C выше второго (8,1 °C), т. е. разность теплового состояния воды и воздуха над морями совпадает.

Как следует из рис. 2, параметры нелинейных трендов в динамике SST Северного и Балтийского морей определяют в основном масштабы слабого похолодания водных масс в 1900—1931 гг. и интенсивного потепления в 1988—2020 гг. До 1932 г. в Балтийском море отмечено умеренное понижение температуры относительно нормы за 1961—1900 гг. (средняя аномалия: –0,40 °C). В Северном море в этот период средняя годовая температура воды была близка к среднемноголетнему уровню (аномалия: –0,09 °C), поскольку происходило чередование непродолжительных фаз, когда она превышала или была ниже его (см. рис. 2).

Как известно, в первой половине XX столетия зафиксировано увеличение температуры воздуха и воды в умеренных и высоких широтах северного полушария, которое получило название «потепление Арктики» [12, 13]. В Северном и Балтийском морях потепление наблюдалось с 1932 по 1950 г. в два этапа. С начала потепления до 1939 г. их годовая температура воды превышала норму. Средняя аномалия водных масс Северного моря составила 0,59 °C, а Балтики — 0,49 °C. Затем наступило кратковременное, но значительное похолодание, когда температура воды в 1940—1942 гг. была ниже среднемноголетнего уровня в среднем на 0,74 °C в Северном и на 1,38 °C в Балтийском морях, что почти в два раза больше по абсолютной величине. С 1943 по 1950 г. температура воды этих морей вновь превышала норму в среднем на 0,39 °C в первом море и на 0,35 °C во втором.

После периода потепления вод Северного и Балтийского морей наступила 25-летняя фаза доминирования короткопериодных случайных колебаний, в течение которой наблюдалось чередование лет с температурой выше и ниже нормы до 1974 г., поэтому ее средние положительные аномалии превысили норму лишь на 0,05 и 0,17 °C соответственно. Наступивший затем период умеренного похолодания водных масс морей был непродолжительным. Средняя температура поверхностных вод Северного моря за 13 лет оказалась на 0,20 °C, а Балтийского моря на 0,54 °C ниже среднемноголетнего уровня. Эти различия могли быть обусловлены более интенсивным похолоданием северной части Европы. После 1987 г. в Северном и Балтийском морях началось современное потепление их водных масс.

Средняя положительная аномалия температуры в 1988—2020 гг. в первом из них составила 0,70 °C, а во втором 0,80 °C. Следовательно сумма абсолютных значений отклонений температуры от нормы в 1900—1931 гг. и последнего теплого периода в Северном море оказалась лишь 0,79 °C, а в Балтийском море 1,20 °C.

Поскольку данные температуры поверхности Северного и Балтийского морей имелись для каждого узла регулярной сетки, то был выполнен анализ пространственного распределения двух основных параметров трендов — процента их вклада в дисперсию исходных выборок и скорости роста SST.

В Северном море при осреднении оценок параметров тренда вдоль широт происходит увеличение его вклада в дисперсию исходной температуры от 60° с.ш. (14%) в южном направлении с максимумом на 54° с.ш. (23%). Ее скорость за каждые 10 лет также растет с севера на юг. При осреднении вдоль меридианов 0, 2, 4 и 6° в.д. вклад среднего тренда в межгодовую изменчивость SST возрастает с запада на восток (табл. 1).

Таблица 1

#### Средние оценки вклада тренда в изменчивость SST Северного и Балтийского морей (*R*<sup>2</sup>, %) и роста температуры за каждые 10 лет (°С / 10 лет) в 1900—2020 гг. вдоль параллелей и меридианов

Average estimations of the trend contribution to the SST variability of the North and Baltic Seas ( $R^2$ , %) and temperature rise for every 10 years (°C / 10 years) in 1900—2020 along parallels and meridians

Северное море							
Широта	54° с.ш.	56° с.ш.	58° с.ш.	60° с.ш.			
$R^2$	23	19	15	14			
°С / 10 лет	0,09	0,07	0,06	0,05			
Долгота	0°	2° в.д.	4° в.д.	6° в.д.			
$R^2$	16	19	18	20			
°С / 10 лет	0,05	0,07	0,07	0,09			
Балтийское море							
Широта	—	56° с.ш.	58° с.ш.	60° с.ш.			
$R^2$	—	19	23	28			
°С / 10 лет	_	0,10	0,11	0,12			
Долгота	18° в.д.	20° в.д.	22° в.д.	24° в.д.			
$R^2$	20	25	28	22			
°С / 10 лет	0,10	0,12	0,13	0,10			

В Балтийском море при осреднении оценок параметров тренда вдоль широты его вклад в дисперсию исходной температуры, в отличие от Северного моря, увеличивается от 19 % на юге (56° с.ш.) до 28 % на севере (60° с.ш.). Такую же направленность имеет и скорость роста температуры за каждые 10 лет. Вдоль меридианов средние оценки параметров тренда не имеют хорошо выраженной пространственной изменчивости. Наибольший вклад его отмечен на 22° в.д. (28 %), так же, как и скорость увеличения температуры воды (13 °C / 10 лет). Низкие значения этих параметров тренда зафиксированы на западе (18° в.д.) и на востоке (24° в.д.) рассматриваемой акватории моря (см. табл. 1).

С целью выявления долгопериодных тенденций в межгодовых колебаниях SST было выполнено исключение нелинейных трендов и осуществлена аппроксимация временных рядов SST Северного и Балтийского морей за 1900-2020 гг. полиномом 5-го порядка (рис. 3). Их вклад в дисперсию исходных данных составил 11 и 10 % соответственно, и они являются статистически значимыми при доверительной вероятности 0.95. Поскольку в течение рассматриваемого периода в колебаниях этих компонент присутствуют два максимума и два минимума, можно предположить, что по времени их наступления период находится в диапазоне 70-75 лет. Первое понижение температуры, обусловленное этим циклом, произошло в конце 1-й — середине 2-ой декад прошлого столетия, а ее повышение наблюдалось в 1930—1940 гг. в период потепления Арктики. Вторая фаза похолодания вод длилась со 2-й половины 1970-х по 2-ю половину 1980-х годов, после чего наступило современное потепление климата (см. рис. 3). В колебаниях годовой SST Северного и Балтийского морей нелинейный тренд и квазивековая компонента в течение 1900—2020 гг. суммарно вносили в дисперсию исходных рядов по 41 %.

Относительно недавно был предложен индекс Атлантической мультидекадной осцилляции — AMO (Atlantic multidecadal oscillation), который имеет и другое название: Атлантическое долгопериодное колебание — АДК. Его наличие подтвердили не только данные наблюдений, но и модельные расчеты [14, 15]. Индекс АМО анализировался при исследованиях динамики климата [13, 16—18], межгодовой изменчивости теплоотдачи из океана в атмосферу в энергоактивных зонах





*R*<sup>2</sup> — коэффициент детерминации 70—75-летниго цикла.

Fig. 3. The difference between the initial SST and its 2nd degree trend values for the Northern (1) and Baltic (2) seas, and 70—75-year cycles in the SST fluctuations, which are shown by dotted curves of the corresponding color.

 $R^2$  — the coefficient of determination of the 70—75-year cycle.

Северной Атлантики [19], температуры воздуха, воды, осадков и стока рек в Северной Америке, Европе и Арктике [20—24], переноса Гольфстримом и Североатлантическим течением теплых атлантических вод в моря, омывающие Европу [25, 26].

В настоящей работе для расчета индекса АМО была использована годовая температура поверхности Атлантического океана (ТПО) для акватории между экватором и 70 с.ш. за 1900—2020 гг. В ее колебаниях, как и в многолетней изменчивости SST Северного и Балтийского морей, нами был выделен статистически значимый нелинейный тренд (рис. 4 *a*), вклад которого в дисперсию исходной выборки составил 43 %. Следует отметить, что этот показатель лишь незначительно превышает долю линейной тенденции в дисперсию ТПО Северной Атлантики.

Как известно, в структуре крупномасштабной циркуляции атмосферы северного полушария с акватории Северо-Восточной Атлантики осуществляется зональный перенос воздушных масс в евроазиатский регион. Его интенсивность оценивается с помощью индекса Североатлантического колебания, в многолетней изменчивости которого за 1900—2020 гг. присутствует статистически значимый нелинейный тренд (рис. 5). Вероятно, это является причиной наличия в колебаниях годовой температуры воздуха Северного и Балтийского морей нелинейной трендовой компоненты по данным метеорологических станций, расположенных



Рис. 4. Межгодовой ход ТПО Северной Атлантики (1) для акватории 0—70° с.ш. в 1900—2020 гг., ее нелинейный тренд (2) (*a*), разность исходной температуры и ее тренда (3), индекс АМО (4), аппроксимированный полиномом 5-й степени (*б*).

*R*<sup>2</sup> — коэффициент детерминации.

Fig. 4. Inter-annual variations SST of the North Atlantic for the water area  $0-70^{\circ}$  N in the 1900–2020 (1), its SST linear trend (2) (*a*), the difference between the initial temperature and its trend (3) and the AMO index (4) approximated by a 5th degree polynomial ( $\delta$ ).

 $R^2$  — the coefficient of determination.



Рис. 5. Изменчивость индекса Северо-Атлантического колебания (декабрь—февраль) (*a*), средней годовой температуры воздуха (Та) Северного (1) и Балтийского (2) морей в 1900—2020 гг. (*б*) и их нелинейные тренды (пунктир).

*R*<sup>2</sup> — коэффициент детерминации нелинейного тренда.

Fig. 5. Variability of the North Atlantic Oscillation index (December—February) (*a*), average annual Ta of the Northern (1) and Baltic (2) seas in 1900—2020 ( $\delta$ ) and their nonlinear trends (dotted line).

 $R^2$  — nonlinear trend determination coefficient.

на их островах и побережье (см. рис. 1). Ее вклад в изменчивость исходных выборок этого параметра первого моря составляет 41 %, а второго — 36 %.

Таким образом, причинами присутствия нелинейных трендов в структуре многолетних колебаний SST Северного и Балтийского морей может быть наличие аналогичных составляющих в межгодовом ходе индексов ТПО Северной Атлантики, а также САК. Влияние последнего осуществляется через теплообмен между водной поверхностью морей и атмосферным воздухом.

После аппроксимации тренда полиномом 2-й степени в колебаниях ТПО Северной Атлантики была получена выборка разности исходных данных и значений, рассчитанных по его уравнению для периода с 1900 по 2020 г., в межгодовом ходе которой присутствует статистически значимая циклическая компонента AMO со средним периодом около 70 лет (см. рис. 4  $\delta$ ). Ее вклад в дисперсию исходного ряда составляет 32 %, а вместе с трендовой компонентой он достигает 75 %. Такой большой вес низкочастотных составляющих в многолетних колебаниях ТПО Северной Атлантики можно объяснить тем, что для получения этих данных проводилось осреднение температуры большого числа трапеций 5×5° на акватории океана от экватора до широты 70° с.ш. В результате этой процедуры уменьшается вклад в общую дисперсию, в первую очередь, высокочастотных колебаний.

Одним из возможных механизмов наличия АМО в вариациях температуры поверхности Северной Атлантики считается сдвиг фаз между долгопериодными изменениями потоков тепла на границе раздела океан—атмосфера в высоких широтах и величинами меридиональных переносов тепла в Субтропической Атлантике [27, 28]. Поскольку на океанографический режим Северного и Балтийского морей оказывает влияние адвекция теплых вод из Атлантики, в многолетних колебаниях их температуры также присутствуют тренды и квазивековые циклы с близким квазипериодом.

Время наступления минимумов и максимумов квазивековой компоненты в колебаниях АМО Северной Атлантики и SST Северного моря не имеет значительных различий (см. рис. 3 и 4), поэтому максимальный коэффициент корреляции между ними оказался без временного сдвига (r = 0.93). Кросскорреляционный анализ индекса АМО и SST Балтийского моря, показал, что наибольший уровень их сопряженности (r = 0.94) существует при запаздывании на 3 года температуры поверхности Балтики. Возможно, это связано с географическим положением моря и особенностью его водообмена с Атлантическим океаном. Северное море имеет достаточно свободное сообщение с его северо-восточной частью, а Балтийское удалено от океана, и адвекция атлантических вод на его акваторию затруднена, поскольку осуществляется через несколько мелководных проливов, соединяющих его с Северным морем. Наличие максимального коэффициента корреляции между индексом АМО и SST Балтийского моря при временном сдвиге, отражающем запаздывание колебаний температуры Балтики, дает возможность разработать методику их прогноза с заблаговременностью 3 года.

Для оценки влияния крупномасштабной циркуляции атмосферы на формирование квазивекового цикла в колебаниях SST Северного и Балтийского морей нами были выполнены расчеты этого ритма в структуре многолетних колебаниях индекса САК и средней годовой температуры воздуха в 1900—2020 гг. по данным наблюдений островных и прибрежных метеостанций этих морей. Они показали, что в межгодовых вариациях усиления и ослабления зональных переносов воздушных масс в европейском регионе эта составляющая статистических незначима. В колебаниях температуры воздуха Северного моря вклад квазивековой компоненты в дисперсию первичных данных составляет всего около 6 %, а Балтийского — всего 4 %. Последний показатель лишь незначительно превышает критическую величину  $R^2$  при уровне доверительной вероятности 0,95. Как было показано выше, эта составляющая вносит 10—11 % в общую дисперсию изменчивости SST этих морей в 1900—2020 гг. Следовательно, если влияние квазивековой цикличности теплового состояния атмосферы на формирование этой составляющей в динамике SST Северного и Балтийского море и существует, то оно незначительное.

Таким образом, факторы, формирующие трендовую и 70-летнюю компоненты в колебаниях годовой ТПО Северной Атлантики, определяют наличие в многолетней динамике SST Северного и Балтийского морей в 1900—2020 гг. нелинейного тренда и квазивекового цикла, которые в основном и обуславливают их океанографический климат. В этот же период в многолетней динамике САК также присутствует нелинейный тренд. Для оценки структуры колебаний SST Северного и Балтийского морей в области средних и высоких частот выполнен спектральный анализ данных после элиминации из исходных выборок значений долгопериодных составляющих. Расчеты показали отсутствие в их частотной структуре существенных различий. Основными энергонесущими являются пики спектральной плотности, соответствующие квазипериодам 12—13, 7—8 лет и 2—3 года. Близость частотной структуры колебаний температура воды морей в этих диапазонах подтверждается достаточно высоким коэффициентом корреляции (r = 0,77) между выборками, по которым рассчитывались спектры. Их генезис может быть связан с гелиогеофизическими, циркуляционными факторами в атмосфере и гидросфере и некоторыми другими. Поскольку и долгопериодные составляющие в колебаниях температуры воды исследуемых морей не имеют значительных различий, то статистическая связь между ее исходными данными достаточно высокая (r = 0,85).

После исключения из исходной выборки годовой ТПО Северной Атлантики (0—70° с.ш.) за 1900—2020 гг. значений долгопериодных составляющих был также выполнен спектральный анализ полученной выборки. Он показал наличие в ее колебаниях циклических составляющих длительностью 23, 9 лет и 3—4 года (рис. 6). Нетрудно заметить, что частотная структура отличается от аналогичной



Рис. 6. Спектральная плотность SST Балтийского моря (*a*) и ТПО Северной Атлантики между экватором и 70° с.ш. (*б*) после исключения из исходных выборок 1900—2020 гг. значений нелинейного тренда и квазивекового цикла.

(Над максимумами спектральной плотности указаны периоды в годах.)

Fig. 6. SST spectral density for the Baltic Sea (*a*) and the North Atlantic between the equator and 70° N ( $\delta$ ) after elimination of the nonlinear trend values and the quasi-secular cycle from the initial samples for the 1900—2020.

(The periods (number of years) are indicated above the spectral density peaks.)

для SST Северного и Балтийского морей. Это подтвердил и корреляционный анализ трех выборок. Статистически значимая связь между температурой воды морей и Северной Атлантики без климатических компонент отсутствует.

Как уже отмечалось в настоящей работе, после 1987 г. температура поверхности Балтийского и Северного морей стала в основном превышать среднемноголетний уровень, т. е. наступил новый период потепления их водных масс (см. рис. 2). Как показали наши исследования, начало и длительное сохранение во времени теплой климатической фазы в последние три десятилетия в Балтийском море проходило на фоне ослабления меридионального типа атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой и увеличения интенсивности западного (W) переноса воздушных масс [29]. В работе [30] отмечено, что в результате перестройки режима взаимодействия океана и атмосферы в конце 1980-х годов начался рост значений индекса САК, что вызвало усиление потока воздушных масс с запада и потепление климата в атлантико-европейском регионе.

Расчет средней скорости роста SST Северном море в 1988—2020 гг. по средним данным для всей рассматриваемой акватории показал, что она увеличивалась на 0,31 °C каждые 10 лет, а в Балтийском море на 0,40 °C / 10 лет при ее средней положительной аномалии 0,70 °C и 0,80 °C соответственно. В отличие от скорости роста температуры вклад трендов в дисперсию ее исходных данных за 1988—2020 гг. оказался близким (37—38 %).

Рассмотрим особенности пространственного распределения параметров линейного тренда SST Северного и Балтийского морей в период потепления в 1988—2020 гг. В Северном море вдоль широт 54, 56, 58 и 60° с.ш. в основном наблюдалось уменьшение вклада тренда в дисперсию температуры за рассматриваемый период, тогда как ее скорость возрастала. Так, по средним данным на меридиане 0° значение  $R^2$  составило 38 %, а на 4° в.д. — 35 %. Скорость же роста температуры поверхности моря увеличилась с 0,29 °C / 10 лет до 0,34 °C / 10 лет соответственно. При осреднении значений  $R^2$  тренда в диапазоне 0—6° в.д. его наибольшая величина оказалась на севере моря (средняя величина — 42 %), а наименьший — на юге (32 %). Следовательно, в меридиональном направлении вклад тренда в дисперсию SST в 1988—2020 гг. уменьшался с севера на юг. Значительных пространственных различий в изменчивости скорости роста теплосодержания водных масс Северного моря в этом направлении не отмечено (табл. 2).

Самая высокая скорость увеличения SST Балтийского моря в период потепления 1988—2020 гг. наблюдалась в мелководном Финском заливе на акватории с центром 60° с.ш. и 26° в.д. (0,51 °C / 10 лет). Следует отметить, что данные для трапеции  $2\times2^\circ$  с центром 60° с.ш. и 28° в.д. в настоящей работе не использовались, так как эта акватория в зимний период часто находится подо льдом, поэтому их репрезентативность вызывает некоторые сомнения. На юго-западном участке моря (параллель 56° с.ш.) скорость ее роста оказалась самой низкой на всей акватории (0,39 °C / 10 лет). Отмечается увеличение вклада тренда в дисперсию исходных данных в восточном направлении с 33 до 39 %. По осредненным данным скорость роста SST Балтийского моря вдоль меридианов и параллелей увеличивалась с юга на север и с запада на восток. С увеличением широты места возрастал процент вклада тренда в дисперсию исходных данных. В зональном направлении этот показатель изменялся в диапазоне 38—40 % и не имел определенного тренда (табл. 3).

Таблица 2

# Вклад линейного тренда в изменчивость SST Северного моря в трапециях $2 \times 2^{\circ}$ , отнесенного к их центрам ( $R^2$ , %) и ее рост за каждые 10 лет (°С / 10 лет) в 1988—2020 гг.

Linear trend contribution to the average SST variability of the North Sea in  $2x2^{\circ}$  trapezoids referred to their centers ( $R^2$ , %) and SST rise for every 10 years (°C / 10 years) in 1988—2020

Параметр	Широта	Долгота				Charman	
		0°	2° в.д.	4° в.д.	6° в.д.	Среднее	
$R^2, \%$	(0%	42	42	41		42	
°С / 10 лет	60 с.ш.	0,30	0,32	0,33		0,32	
$R^2$ , %	599	37	37	36	—	37	
°С / 10 лет	38 с.ш.	0,29	0,31	0,33		0,31	
$R^2$ , %	5(0)	35	34	32	33	34	
°С / 10 лет	36 с.ш.	0,29	0,31	0,33	0,31	0,31	
$R^2$ , %	<b>5</b> 49 a are		33	32	30	32	
°С / 10 лет	54° C.III.		0,33	0,35	0,35	0,34	
$R^2$ , %	Charman	38	36	35			
°С / 10 лет	Среднее	0,29	0,32	0,34			

*Примечание*: критическое значение  $R^2_{_{\rm kp}}$  при длине выборки 33 и уровне доверительной вероятности  $\gamma = 0.95$  составляет 0.13 или 13 %.

Таблица 3

# Вклад линейного тренда в изменчивость средней SST Балтийского моря в трапециях 2×2°, отнесенного к их центрам (*R*<sup>2</sup>, %) и ее рост за каждые 10 лет (°C / 10 лет) в 1988—2020 гг.

Параметр	Широта	Долгота					Crearia	
		16° в.д.	18° в.д.	20° в.д.	22° в.д.	24° в.д.	26° в.д.	Среднее
$R^2, \%$	60° с.ш.	—	—	39	40	38	41	40
°С / 10 лет		_	_	0,46	0,47	0,47	0,51	0,48
$R^2, \%$	58° с.ш.	_	39	40	41	37	_	39
°С / 10 лет		_	0,45	0,42	0,43	0,47	_	0,44
$R^2, \%$	56° с.ш.	33	37	39	_		_	36
°С / 10 лет		0,39	0,41	0,41	_	_	_	0,40
$R^2, \%$	Среднее	_	38	39	40	38	_	_
°С / 10 лет			0,43	0,43	0,45	0,47	_	_

Linear trend contribution to the average SST variability of the Baltic Sea in  $2 \times 2^{\circ}$  trapezoids referred to their centers ( $R^2$ , %) and SST rise for every 10 years (°C / 10 years) in 1988—2020

*Примечание*: критическое значение  $R_{\rm kp}^{2}$  при длине выборки 33 и уровне доверительной вероятности  $\gamma = 0.95$  составляет 0.13 или 13 %.

#### Выводы

Сравнительный анализ частотных структур межгодовых колебаний SST Северного и Балтийского морей в 1900—2020 гг. показал отсутствие существенных различий. В спектральном составе выявлены тренд 2-й степени, долгопериодная 70—75-летняя составляющая и квазипериодичности 12—13, 7—8 лет и 2—3 года. Поэтому статистическая связь между исходными данными достаточно высокая (r = 0.85).

Установлено, что в течение 1900—2020 гг. в динамике годовой SST Северного и Балтийского морей имели место следующие климатические фазы.

• В 1900—1931 гг. в Балтийском море отмечено умеренное похолодание вод относительно нормы за 1961—1990 гг. (аномалия –0,40 °С). В Северном море средняя температура воды была близка к норме (аномалия –0,09 °С), так как происходило чередование непродолжительных фаз потепления и похолодания.

• В 1932—1939 гг. в период «потепления Арктики» SST Северного моря превышала норму на 0,59 °С, а Балтийского — на 0,49 °С. В 1940—1942 гг. наступило значительное понижение температуры, когда ее средняя аномалия составила -0,74 °С и -1,38 °С соответственно. С 1943 по 1950 г. в Северном море она вновь превысила норму на 0,39 °С, а в Балтийском — на 0,35 °С.

• В 1951—1974 гг. в спектре температуры доминировали высокочастотные колебания, поэтому средняя температура Северного моря в этот период близка к климатической норме (0,05 °C), а Балтийского моря — превышала ее всего на 0,17 °C.

• В 1975—1987 гг. наблюдалось непродолжительное умеренное похолодание водных масс, когда SST Северного моря оказалась на 0,20 °C, а Балтийского моря — на 0,54 °C ниже нормы.

• Период с 1988 по 2020 г. является фазой современного потепления морского климата, поскольку SST Северного моря на 0,70 °С, а Балтийского моря — на 0,80 °С превысила норму.

В многолетних колебаниях ТПО акватории Северной Атлантики (0—70° с.ш.) выявлено наличие нелинейного тренда и 70-летнего цикла, как и в температуре поверхности Северного и Балтийского морей. Наличие высокой статистической связи между низкочастотными компонентами ТПО Атлантики и SST морей (r > 0,90) указывает на то, что формирующие их факторы являются одинаковыми. При этом наибольшая корреляционная связь между ТПО Северной Атлантики и SST Северного моря имеет место без временного лага, а между Балтийским морем — при его запаздывании на 3 года, что дает возможность разработать методику долгосрочного прогноза динамики климатических составляющих температуры Балтики.

Установлено, что современное потепление водных масс в 1988—2020 гг. интенсивнее протекало на акватории Балтийского моря, чем Северного. Скорость повышения температуры за каждые 10 лет составила 0,40 °С и 0,31 °С при ее средней положительной аномалии за этот период 0,80 °С и 0,70 °С соответственно. Главной причиной более интенсивного роста SST Балтийского моря по сравнению с Северным морем может быть то, что темпы потепления территории Европы были выше, чем над акваторией Северо-Восточной Атлантики. В Балтийском море ее скорость увеличивалась с юга на север и с запада на восток, тогда как в Северном море хорошо выраженных пространственных изменений этого показателя не зафиксировано.

#### Список литературы

- Smith T.M., Reynolds R.W. Extended reconstruction of global sea surface temperatures based on COADS data (1854—1997) // Journal of Climate. 2003. Vol. 16. P. 1495—1510. doi: 10.1175/1520-0442-16.10.1495.
- Huang B., Thorne P.W., Banzon V.F., Boyer T., Chepurin G., Lawrimore J.H., Menne M.J., Smith T.M., Vose, Zhang H.-M. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5 (ERSSTv5), R.S.Upgrades, validations, and intercomparisons // J. Climate. 2017. Vol. 30. P. 8179—8205. doi: 10.1175/ JCLI-D-16-0836.1.
- Huang B., Angel W., Boyer T., Cheng L., Chepurin G., Freeman E., Liu C., Zhang H.-M., Evaluating SST analyses with independent ocean profile observations //J. Climate, 2018. Vol. 31. P. 5015—5030. doi: 10.1175/JCLI-D-17-0824.1.
- Belkin I.M. Rapid warming of large marine ecosystems // Progress in Oceanography. 2009. Vol. 81. P. 207—213.
- 5. Серых И.В., Костяной А.Г. О климатических изменениях температуры Балтийского моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, № 3. С. 5—12.
- Lehmann A., Getzlaff K., Harlab J. Detailed assessment of climate variability of the Baltic Sea area for the period 1958—2009 // Climate Research. 2011. Vol. 46. P. 185—196.
- Gustafsson B.F., Schenk T., Blenckner K., Eilola H.E., Meier M., Müller-Karulis B.T. Neumann T., Ruoho-Airola, Savchuk O.E., Schenk Z. Reconstructing the development of Baltic Sea eutrophication 1850—2006 // AMBIO. 2012. Vol. 41. P. 534—548. doi: 10.1007/s13280-012-0318-x.
- Stramska M., Bialogrodzka J. Spatial and Temporal Variability of Sea Surface Temperature in the Baltic Sea Based on 32-years (1982—2013) of Satellite Data // Oceanologia. 2015. V. 57. Iss. 3. P. 223—235.
- Kniebusch M., Meier H.E., Neumann M., Börgel T.F. Temperature variability of the Baltic Sea since 1850 and attribution to atmospheric forcing variables // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. Vol. 124. P. 4168—4187. doi: 10.1029/2018JC013948.
- 10. Users Guide by Sea Solve Software Inc. AutoSignal, 2003.
- 11. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2008. 407 с.
- 12. Bengtsson L., Semenov V.A., Johannessen O.M. The Early Twentieth-Century Warming in the Arctic a Possible Mechanism // J. Climate. 2004. V. 17. P. 4045—4057.
- 13. *Малинин В.Н., Вайновский П.А.* О причинах первого потепления Арктики XX столетия // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 53. С. 34—55.
- Knight J.R., Folland C.K., Scaife A.A. Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. No. L17706. doi: 10.1029/2006GL026242.
- Chylek P., Lesins G. Multidecadal variability of Atlantic hurricane activity: 1851–2007 // Journal of Geophysical Research. 2008. V. 113. D22106. doi:10.1029/2008JD010036.
- Legutke S., Marsland S., Mikolajewicz U. Reconstructing, monitoring and predicting multidecadal-scale changes in the North Atlantic thermohaline circulation with sea surface temperature // Journal of Climate. 2004. Vol. 17. P. 1605—1614.
- 17. Parker D., Folland C., Scaife A., Knight J., Colman A., Baines P., Dong B. Decadal to multidecadal variability and the climate change background // J. Geophys Res. 2007. 112: D18115. doi: 10.1029/2 007JD008411.
- Chylek P., James K.D., Dubey M. K., Hengartner N. The role of Atlantic Multidecadal Oscillation in the global mean temperature variability // Clim Dyn. 2016. Vol. 47. P. 3271—3279. doi: 10.1007/s00382-016-3025-7.
- Малинин В.Н., Шмакова В.Ю. Изменчивость энергоактивных зон океана в Северной Атлантике // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. Т. 4. С. 55—70. doi: 10.21513/2410-8758-2018-4-55-70.

- 20. Выручалкина Т.Ю., Филатов Н.Н., Двианский Н.А., Гусев А.В. О прогнозе многолетних изменений уровня крупных озер // Труды Карельского научного центра РАН. Серия Лимнология. Гидрофизика. Гидрология. 2016. № 9. С. 3—16. doi: 10.17076/lim480.
- Enfield D.B., Mestas-Nunez A.M., Trimble P.J.. The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental U.S. // Geophys. Res. Lett. 2002. Vol. 28. P. 2077— 2080.
- Knight J.R., Folland C.K., Scaife A.A. Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. No. L17706. doi: 10.1029/2006GL026242.
- Trenberth K.E. Dennis S.J. Atlantic hurricanes and natural variability in 2005 // Geophysical research letters. 2006. Vol. 33. No. L12704. doi: 10.1029/2006GL026894.
- Teegavarapu R.S.V., Goly A., Obeysekera J. Influences of Atlantic Multi-Decadal Oscillation on Regional Precipitation Extremes //Journal of Hydrology. 2013. V. 495. P. 74—93.
- 25. Sutton R.T., Hodson, D.L.R. Atlantic Ocean forcing of North American and European summer climate // Science. 2005. Vol. 30. No. 5731. P. 115—118.
- Pohlmann H., Sienz F., Latif M. Influence of the multidecadal Atlantic meridional overturning circulation variability on European climate // Journal of Climate. 2006. Vol. 19. P. 6062—6067.
- 27. Федоров В.М. Инсоляция Земли и современные изменения климата. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. 231 с.
- 28. Дианский Н.А., Багатинский В.А. Термохалинная структура вод Северной Атлантики в различные фазы Атлантической мультидекадной осцилляции // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 157—170. doi: 10.31857/S0002-3515556157-170.
- Педченко А.П., Бойцов В.Д. Особенности многолетней динамики климата и ее влияние на распределение и промысел сельдевых видов рыб Балтийского моря // Труды ВНИРО. 2020. Т. 180. С. 44—59. doi: 10.36038/2307-3497-2020-180-44-59.
- 30. *Нестеров Е.С.* Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: Триада; ЛТД, 2013. 144 с.

#### References

- 1. Smith T.M., Reynolds R.W. Extended reconstruction of global sea surface temperatures based on COADS data (1854—1997). Journal of Climate. 2003, 16: 1495—1510. doi: 10.1175/1520-0442-16.10.1495.
- Huang B., Thorne P.W., Banzon V.F., Boyer T., Chepurin G., Lawrimore J.H., Menne M.J., Smith T.M., Vose R.S., Zhang H.-M. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5 (ERSSTv5), Upgrades, validations, and intercomparisons. J. Climate. 2017, 30: 8179–8205. doi: 10.1175/JC-LI-D-16-0836.1.
- Huang B., Angel W., Boyer T., Cheng L., Chepurin G., Freeman E., Liu C., Zhang H.-M. Evaluating SST analyses with independent ocean profile observations. J. Climate. 2018, 31: 5015—5030. doi: 10.1175/JCLI-D-17-0824.1.
- Belkin I.M. Rapid warming of large marine ecosystems. Progress in Oceanography. 2009, 81(1): 207–213.
- Serykh I.V., Kostianoy A.G. About the climatic changes in the temperature of the Baltic Sea. Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika. Fundamental and Applied Hydrophysics. 2019, 12, 3: 5–12. doi: 10.7868/S207366731903002X. [In Russian].
- Lehman, A., Getzlaf, K., Harlaβ J. Detailed assessment of climate variability of the Baltic Sea area for the period 1958—2009. Climate Research. 2011, 46: 185—196.
- Gustafsson B.F., Schenk T., Blenckner K., Eilola H.E., Meier M., Müller-Karulis B., Neumann T., Ruoho-Airola T., Savchuk O.E., Schenk Z. Reconstructing the development of Baltic Sea eutrophication 1850—2006. AMBIO. 2012, 41: 534—548. doi:10.1007/s13280-012-0318-x.
- 8. *Stramska M., Bialogrodzka J.* Spatial and temporal variability of sea surface temperature in the Baltic Sea based on 32-years (1982—2013) of satellite data. Oceanologia. 2015, 57(3): 223—235.
- Kniebusch M., Meier H.E., Neumann M., Börgel T.F. Temperature variability of the Baltic Sea since 1850 and attribution to atmospheric forcing variables. Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019, 124: 4168–4187. doi: 10.1029/2018JC013948.
- 10. Users Guide by Sea Solve Software Inc. AutoSignal, 2003.

- 11. Malinin V.N. Statisticheskie metody analiza gidrometetorologicheskoy informacii. Statistical methods for the analysis of hydrometeorological information. St. Petersburg: RSHU, 2008: 408 p. [In Russian].
- Bengtsson L., Semenov V.A., Johannessen O.M. The Early Twentieth-Century Warming in the Arctic a Possible Mechanism. J. Climate. 2004, 17: 4045–4057.
- Malinin V.N., Vainovsky P.A. On the causes of the first warming of the Arctic in the 20th century. Uchenye zapiski RGGMU. Proceedings of the RSHU. 2018, 53: 34—55. [In Russian].
- Knight J.R., Folland C.K, Scaife A.A. Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation. Geophys. Res. Lett. 2006, 33, L17706. doi: 10.1029/2006GL026242.
- Chylek P., Lesins G. Multidecadal variability of Atlantic hurricane activity: 1851—2007. Journal of Geophysical Research. 2008, 113, D22106. doi: 10.1029/2008JD010036.
- Legutke S, Marsland S, Mikolajewicz U. Reconstructing, monitoring and predicting multidecadal-scale changes in the North Atlantic thermohaline circulation with sea surface temperature. Journal of Climate.2004, 17: 1605—1614.
- 17. Parker D, Folland C, Scaife A, Knight J, Colman A, Baines P, Dong B. Decadal to multidecadal variability and the climate change background. J. Geophys Res. 2007, 112, D18115. doi: 10.1029/2 007JD008411.
- Chylek Petr, Klett James D., Dubey Manvendra K., Hengartner Nicolas. The role of Atlantic Multi-decadal Oscillation in the global mean temperature variability. Clim Dyn. 2016, 47: 3271—3279. doi: 10.1007/s00382-016-3025-7.
- Malinin V.N., Shmakova V.Yu. Variability of the energy-active ocean zones in north atlantic. Fundamental'naja i prikladnaja klimatologija. Fundamental and applied climatology. 2018, 4: C. 55—70. doi: https://doi.org/10.21513/2410-8758-2018-4-55-70. [In Russian].
- Vyruchalkina T.Yu., Filatov N.N., Diansky N.A., Gusev. A.V. On forecasting long-term variations of water level in large lakes. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*. Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. A Series of Limnology. Hydrophysics. Hydrology. 2016, 6: 3—16. doi: 10.17076/lim480. [In Russian].
- 21. *Enfield D.B., Mestas-Nunez A.M., Trimble P.J.* The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental U.S. Geophys. Res. Lett. 2002, 28: 2077–2080.
- Knight J.R., Folland C.K, Scaife A.A. Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation. Geophys. Res. Lett. 2006, 33, L17706. doi: 10.1029/2006GL026242.
- Trenberth K.E., Dennis S.J. Atlantic hurricanes and natural variability in 2005. Geophysical research letters. 2006, 33, L12704. doi: 10.1029/2006GL026894.
- Teegavarapu R.S.V., Goly A., Obeysekera J. Influences of Atlantic Multi-Decadal Oscillation on Regional Precipitation Extremes. Journal of Hydrology. 2013, 495: 74—93.
- Sutton R.T., Hodson D.L.R. Atlantic Ocean forcing of North American and European summer climate. Science. 2005, 309(5731): 115—118.
- Pohlmann H., Sienz F., Latif M. Influence of the multidecadal Atlantic meridional overturning circulation variability on European climate. Journal of Climate. 2006, 19(23): 6062—6067.
- 27. Fedorov V.M. Insoliatsiia Zemli i sovremennye izmeneniia klimata. Insolation of the Earth and modern climate changes. Moscon: FIZMATLIT, 2018: 231 p. [In Russian].
- Diansky N.A., Bagatinsky V.A. The thermohaline structure of the North Atlantic waters in different phases of the Atlantic multidecadal oscillation. *Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Fizika atmosfery i* okeana. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Atmospheric and ocean physics. 2019, 55, 6: 157–170. doi: 10.31857/S0002-3515556157-170. [In Russian].
- Pedchenko A.P., Boitsov V.D. Features of long-term climate dynamics and its impact on the distribution and fishing of herring fish species in the Baltic Sea. *Trudy VNIRO*. Proceedings of VNIRO. 2020, 180: 44—59. doi: 10.36038/2307-3497-2020-180-44-59. [In Russian].
- 30. *Nesterov E.S. Severoatlanticheskoe kolebanie: atmosfera i ocean.* The North Atlantic oscillation: the atmosphere and the Ocean. Moscon: Triada, LTD, 2013: 144 p. [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 28.02.2021 Принята к публикации после доработки 10.05.2021

### Сведения об авторе

*Бойцов Владимир Дмитриевич*, д-р геогр. наук, старший научный сотрудник, Новгородский филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» (НовгородНИРО), vboitsovd@ mail.ru.

## Information about author

*Boitsov Vladimir Dmitrievich*, Grand PhD (Geogr. Sci.), Senior Researcher, Novgorod Branch of the Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography (NovgorodNIRO).