

УДК 551.465.62 (262.5)

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИНХРОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЗИМНЕЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В БАРЕНЦЕВОМ И ЧЁРНОМ МОРЯХ

© 2021 г. А. А. Сизов^{1,*}, Т. М. Баянкина¹, В. Л. Посошков¹, А. Е. Анисимов¹

Представлено академиком РАН В.М. Котляковым 05.08.2021 г.

Поступило 05.08.2021 г.

После доработки 05.08.2021 г.

Принято к публикации 09.08.2021 г.

Рассматриваются условия формирования аномалий поверхностной температуры Баренцева и Чёрного морей в январе–марте. Показано, что как межгодовая, так и междесятилетняя изменчивость аномалии поверхностной температуры в этих морях определяется тепловым состоянием вод Северной Атлантики и происходит синхронно как в годы отрицательных, так и в годы положительных значений индекса Атлантической мультideкадной осцилляции. При этом средняя аномалия поверхностной температуры этих морей формируется под воздействием циркуляции атмосферы в Атлантико-Европейском регионе, определяемой индексом Североатлантического колебания (САК). В годы САК ≥ 1 поверхностная температура Баренцева моря выше, а Чёрного моря ниже климатической нормы. В годы САК ≤ -1 поверхностная температура Баренцева моря ниже, а Чёрного моря выше климатической нормы.

Ключевые слова: Баренцево море, Чёрное море, аномалия поверхностной температуры, Атлантическая мультideкадная осцилляция, Североатлантическое колебание

DOI: 10.31857/S2686739721110141

Аномалии температуры поверхности (АТП) в Баренцевом и Чёрном морях зимой формируются под воздействием циркуляции атмосферы в Атлантико-Европейском регионе и притока атлантических вод в западный сектор Северного Ледовитого океана. Циркуляция атмосферы, определяемая индексом Североатлантического колебания (САК) [1–3], регулирует поступление теплого атлантического воздуха в средние и высокие широты Атлантико-Европейского региона. Это регулирование осуществляется через циклоническую активность, которая проявляется в смещении траектории циклонов в разные фазы САК. В положительную фазу САК циклоны смещаются к северу, в отрицательную фазу – к югу [1, 2]. На формирование АТП Баренцева моря оказывает влияние приток атлантических вод [4–6]. При этом на межгодовом и междесятилетнем масштабах поступление этих вод в Североевропейские моря, включая Баренцево море, регулируется циркуляцией атмосферы (индекс САК) [7, 8]. По оценке [8] максимальное поступление атлантических вод в Севе-

роевропейские моря отмечается в отрицательную фазу САК. С другой стороны, тепловое состояние Северной Атлантики, представленное Атлантической мультideкадной осцилляцией (АМО), изменяется в широком диапазоне масштабов [4, 9, 10]. При этом мультideкадная мода САК соответствует АМО таким образом, что положительной (отрицательной) фазе САК соответствует отрицательная (положительная) фаза АМО [11, 12]. В отличие от Баренцева моря, АТП Чёрного моря формируется в основном за счет влияния воздушных масс, приносимых в регион атмосферной циркуляцией, определяемой индексом САК.

Цель работы заключается в рассмотрении механизма синхронного формирования АТП в Баренцевом и Чёрном морях в разные фазы АМО.

Аномалии поверхностной температуры Баренцева и Чёрного морей выбирались из массивов Центра прогноза климата национальной администрации по океану и атмосфере Хэдли [13] (Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature data set (HadISST) <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/had-isst/>). Индекс САК, средний за январь–март, выбирался из архива Национального метеорологического центра (Climate Prediction Center <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml>). Индекс АМО представлен на сайте

¹ Морской гидрофизический институт
Российской академии наук, Севастополь, Россия
*E-mail: sizov_anatoliy@mail.ru

<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/>. Широтное положение изогипсы 540 дкм (Высотная фронтальная зона – ВФЗ) на меридианах 0° и 30° в.д. вычислялась по данным NOAA Extended SST (ERSST) на сайте <https://psl.noaa.gov/cgi-bin/data/composites/>.

Для анализа использовалось среднее за декабрь–март значение индекса САК. Индекс АМО был представлен в виде среднего за январь–март и среднегодового значения. Аномалии температуры Баренцева и Чёрного морей осреднялись за январь–март. По этим исходным характеристикам оценивались межгодовая изменчивость АТП и ее корреляционная связь с индексами САК и АМО. Междесятилетняя изменчивость АТП и ее связь с индексами САК и АМО анализировались по осредненным за десять лет исходным рядам. Для оценки траекторий барических систем над Атлантико-Европейском регионом использовалось широтное положение ВФЗ в феврале.

Анализ корреляции ВФЗ и значений индекса САК проводился по сглаженным фильтром скользящего среднего исходным рядам, а анализ пространственного распределения аномалий поверхностной температуры проводился по композитным картам. Акватории Баренцева и Чёрного морей ограничивались координатами 28°–43° в.д., 72°–77° с.ш. и 28°–42° в.д., 41°–47° с.ш. соответственно.

Междесятилетняя изменчивость индексов АМО и САК на временном интервале 1948–2020 гг. происходила со сдвигом фазы, поэтому для анализа совместного влияния процессов, определяемых этими индексами на формирование аномалии поверхностной температуры Баренцева и Чёрного морей, были выбраны два временных отрезка.

Первый временной отрезок (1957–1994 гг.) характеризовался преобладанием отрицательного значения индекса АМО, который условно был определен как период “холодной” Северной Атлантики. Второй временной отрезок (1995–2020 гг.) соответствовал положительному значению индекса АМО, названный условно периодом “теплой” Северной Атлантики. Учитывая оценки, полученные в [3], годы с отрицательными значениями АМО характеризовались преобладанием процессов с САК ≤ -1, а в годы с положительными значениями АМО преобладали процессы, характерные для САК ≥ 1.

Атлантические воды непосредственно участвуют в формировании температуры верхнего слоя Баренцева моря [14]. Поэтому полученные нами оценки показывают, что междесятилетняя изменчивость индекса АМО и АТП Баренцева моря имеет значимую положительную корреляцию ($R = 0.82$) на временном интервале 1950–2020 гг. В то же время формирование АТП Чёрного моря происходит, по-видимому, под слабым воздей-

ствием долговременного (климатического) изменения АМО. Поэтому междесятилетняя изменчивость АТП Чёрного моря не значимо коррелирует с АМО, но оно значимо отрицательно коррелировано с индексом САК ($R = -0.71$). Это свидетельствует о том, что междесятилетняя изменчивость АТП Чёрного моря в значительной степени определяется циркуляцией атмосферы в Атлантико-Европейском регионе. В то же время межгодовая изменчивость АТП Чёрного моря в меньшей степени зависит от колебания индекса САК, при этом корреляция между этим параметром и АТП Чёрного моря отрицательная и составляет -0.29 и -0.31 в период преобладания отрицательного и положительного значений индекса АМО соответственно. Эти оценки согласуются с выводами, полученными в [15], и дают основание полагать, что, по-видимому, траектории циклонов, переносящих воздушные массы в район Чёрного моря, определяются не только индексом САК, но и положением высотной фронтальной зоны (ВФЗ).

Известно, что барические системы в Атлантико-Европейском регионе переносятся в направлении ведущего потока, отождествляемого с положением изогипс в ВФЗ. Но в изменчивости широтного положения ВФЗ на меридиане 30° в.д. преобладает низкочастотная компонента, что подтверждается значимой отрицательной корреляцией осредненных по десяти годам рядов ВФЗ и АМО ($R = -0.70$). Эта корреляция показывает, что низкочастотная изменчивость аномалии поверхностной температуры Северной Атлантики влияет на положение ВФЗ над восточной Европой таким образом, что в отрицательную фазу АМО ВФЗ сдвигается на север, а в положительную фазу АМО ВФЗ занимает более южное положение. Более того, существуют заметные особенности в изменении широтного положения ВФЗ над восточной и западной Европой в годы отрицательных и положительных значений индекса АМО. Эти особенности хорошо выделяются в рядах, сглаженных фильтром пятилетнего скользящего среднего. В табл. 1 показаны корреляции широтного положения ВФЗ в феврале и среднего за декабрь–март значения САК. Жирным выделены величины, значимые на 95% уровне доверительной вероятности.

Как следует из табл. 1, в годы отрицательных значений индекса АМО широтное положение ВФЗ как над западной, так и над восточной Европой изменяется синфазно. При этом ВФЗ на 0° и на 30° в.д. проявляет тенденцию сдвигаться к северу в годы с максимальными значениями САК и к югу в годы с минимальными значениями САК. Особенно это заметно на 30° в.д. (корреляция между ВФЗ и САК равна 0.60).

В годы положительных значений индекса АМО широтное положение ВФЗ над западной и

Таблица 1. Коэффициенты корреляции широтного положения ВФЗ на 0° и 30° в.д. с индексом САК в различные фазы индекса АМО

Параметры	Отрицательная фаза АМО			Параметры	Положительная фаза АМО		
	0°	30° в.д.	САК		0°	30° в.д.	САК
0°		0.49	0.26	0°		-0.53	-0.57
30° в.д.	0.49		0.60	30° в.д.	-0.53		0.49
САК	0.26	0.60		САК	-0.57	0.49	

восточной Европой изменяется в противофазе. В годы с максимальными значениями САК ВФЗ над западной Европой сдвигается на юг ($R = -0.57$), а над восточной Европой – на север ($R = 0.49$). Следовательно, траектории циклонов над Европой выстраиваются таким образом, что в годы отрицательных значений индекса АМО преобладает зональный перенос воздушных масс, и он происходит тем севернее, чем выше значения САК. В годы положительных значений индекса АМО процесс переноса воздушных масс усложняется и в этом случае при высоких значениях индекса САК траектории циклонов над западной Европой занимают более южное положение, а над восточной Европой – более северное. При малых значениях САК траектории циклонов над западной Европой смещаются на север, а над восточной Европой – на юг.

В отличие от Чёрного моря, межгодовая изменчивость АТП Баренцева моря значимо коррелирована с индексом САК как в годы отрицательных значений индекса АМО ($R = 0.41$), так и в годы положительных значений индекса АМО ($R = 0.70$). Это связано, по-видимому, с тем, что в этом регионе в фазу САК ≥ 1 возрастает циклоническая активность, а в фазу САК ≤ -1 она ослабевает [3, 16]. При этом половину общего числа циклонов составляют глубокие циклоны, и их повторяемость возрастает в годы положительных значений индекса АМО [14].

Отмеченные особенности межгодовой и междесятилетней изменчивости зимней циркуляции атмосферы и переноса атлантических вод в регионах Баренцева и Чёрного морей создают характерные условия формирования АТП этих морей. Подобное наблюдается как в годы отрицательных, так и в годы положительных значений индекса АМО. Эти условия формирования АТП реализуются синхронно в Баренцевом и Чёрном морях, что хорошо иллюстрируется на композитных картах, построенных по АТП, осредненным за годы САК ≥ 1 и САК ≤ -1 . На рис. 1 показаны композитные карты, относящиеся к годам отрицательных значений индекса АМО.

Композитные карты АТП для режима САК ≥ 1 строились по семи годам (1957, 1976, 1983, 1990, 1991, 1992, 1993), а соответствующие карты для

режима САК ≤ -1 строились по десяти годам (1958, 1960, 1962, 1963, 1965, 1966, 1968, 1969, 1970, 1979). Климатическая норма определялась за период 1981–2010 гг. На рис. 1а хорошо видно, что в годы отрицательных значений индекса АМО в режиме САК ≥ 1 вследствие интенсификации циклонической активности [1–3, 16] средняя за январь–март температура поверхности Баренцева моря становилась выше климатической нормы, а в Чёрном море (рис. 1б) она была ниже климатической нормы.

Это происходило в силу того, что при САК ≥ 1 ВФЗ на меридиане 30° в.д. сдвигалась к северу и, следовательно, траектории циклонов пролегли севернее Чёрного моря. Режим САК ≤ -1 в годы отрицательных значений индекса АМО показан на рис. 1в, 1г. В этом случае вследствие ослабления циклонической активности в регионе Баренцева моря [1–3] его поверхностная температура была ниже климатической нормы. В то же время при САК ≤ -1 ВФЗ над восточной Европой занимает южное положение и, следовательно, Чёрное море оказывается в области прохождения циклонов. В результате температура поверхности Чёрного моря становилась выше климатической нормы (рис. 1г).

Аналогичные условия формирования АТП Баренцева и Чёрного морей наблюдались и в годы с положительной аномалией АМО (1995–2020 гг.). Рассчитанные по одиннадцати годам с САК ≥ 1 и шести годам с САК ≤ -1 композитные карты аномалии поверхностной температуры позволили получить следующие оценки.

Климатический ряд за 1981–2010 гг., относительно которого вычислялись АТП, включал годы с отрицательными и положительными аномалиями АМО. Средние поверхностные температуры Чёрного и Баренцева морей в 1995–2020 гг. заметно превышали климатические значения, поэтому их АТП были положительными. Но и в этом случае сохранилась противофазность в синхронном распределении АТП в Баренцевом и Чёрном морях. Режим САК ≥ 1 характеризовался повышенной АТП Баренцева моря ($+0.53^\circ\text{C}$) и пониженной АТП Чёрного моря ($+0.59^\circ\text{C}$), а при САК ≤ -1 АТП Баренцева моря была понижен-

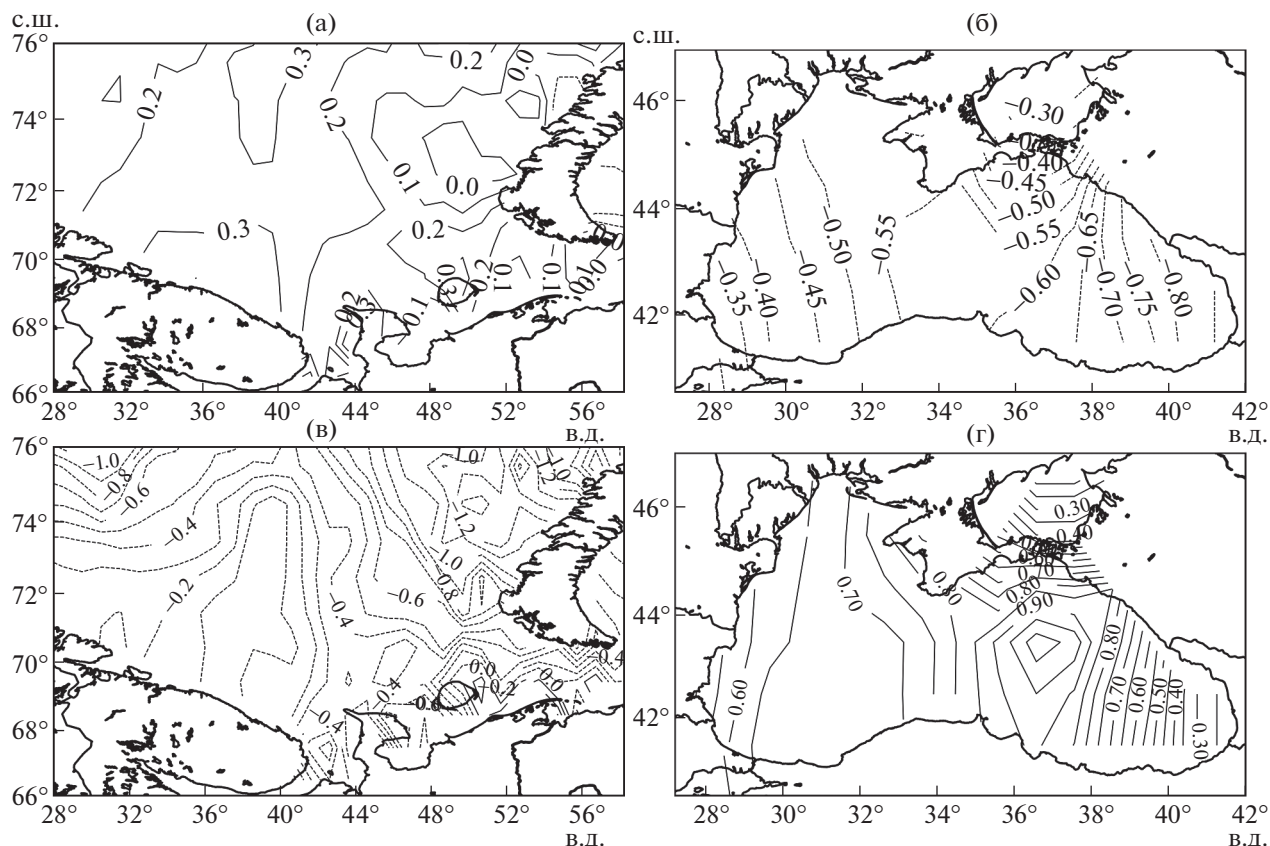


Рис. 1. Аномалии температуры поверхности в годы отрицательных значений индекса АМО при САК ≥ 1 (а, б) и САК ≤ -1 (в, г) для Баренцева и Чёрного морей соответственно.

ной (+0.10°C), а Чёрного моря – повышенной (+0.98°C).

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы. Междесятилетнее изменение теплового состояния верхнего слоя Северной Атлантики (индекс АМО) регулирует через приток атлантических вод и перенос воздушных масс (циклоническая активность) зимнюю поверхностную температуру Баренцева и Чёрного морей. При этом как в группу лет с отрицательными, так и в группу лет с положительными значениями АМО температура поверхности Баренцева моря становилась выше, а Чёрного моря – ниже климатической нормы при САК ≥ 1 .

Режим САК ≤ -1 характеризовался тем, что температура поверхности Баренцева моря становилась ниже, а Чёрного моря – выше климатической нормы. Эти результаты важны, в частности, для оценки климатических особенностей синхронного процесса перемешивания верхнего слоя Баренцева и Чёрного морей.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0002 “Фундаментальные ис-

следования процессов взаимодействия в системе океан–атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Sorteberg A., Kvamsto N.G., Byrkjedal O. Wintertime Nordic Seas, Cyclone Variability and Its Impact on Oceanic Volume Transports into the Nordic Seas // The Nordic Seas: An Integrated Perspective. Geophysical Monograph. Series 158. American Geophysical Union. 2005. 137–156. <https://doi.org/10.1029/158GM10>
- Hurrell J.W., Deser C. North Atlantic Climate Variability: The Role of the North Atlantic Oscillation // Journal of Marine Systems. 2009. V. 78 (1). P. 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.11.026>
- Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: 2013. С. 127.
- Алексеев Г.В., Иванов Н.Е., Пнюшков А.В., Балакин А.А. Изменение климата в морской Арктике в начале XXI века // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 3 (86). С. 22–34.
- Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е. Изменение климата Арктики при глобальном потеплении // Про-

- блемы Арктики и Антарктики. 2015. № 1 (103). С. 32–41.
6. Смирнов В.В., Кораблев А.А., Вязилова А.Е. Сезонная и межгодовая изменчивость термохалинных характеристик вод в районе корабля погоды “Майк” // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 2 (100). С. 25–32.
 7. Polyakov I.V., Alekseev G.V., Timokhov L.A., Bhatt U.S., Colony R.L., Simmons H.L., Walsh D., Walsh I.E., Zakharov N.F. Variability of the Intermediate Atlantic Water of Arctic Ocean over the Last 100 Years // Journal of Climate. 2004. V. 17. (23). P. 4485–4496. <https://doi.org/10.1175/JCLI-3224.1>
 8. Дворянинов Г.С., Кубряков А.А., Сизов А.А., Станичный С.В., Шапиро Н.Б. Североатлантическое колебание – доминирующий фактор изменчивости циркуляционных океанических систем Северной Атлантики // ДАН. 2016. Т. 466. № 3. С. 345–349. <https://doi.org/10.7868.S0869565216030208>
 9. Enfield D.B., Cid-Serrano L. Secular and Multidecadal Warmings in the North Atlantic and Their Relationships with Major Hurricane Activity // Int. J. of Climatology. 2010. V. 30 (2). P. 174–184. <https://doi.org/10.1002/joc.1881>
 10. Yashayaev I., Seidov D. The Role of the Atlantic Water in Multidecadal Ocean Variability in the Nordic and Barents Seas // Progress in Oceanography. 2015. V. 132. P. 68–127. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.11.009>
 11. Семенов В.А., Черенкова Е. Оценка влияния атлантических Многодекадных колебаний на крупномасштабную атмосферную циркуляцию в атлантическом регионе летом // ДАН. 2018. Т. 478, № 6. С. 697–701. <https://doi.org/10.7868/S0869565218060178>
 12. Крашенинникова С.Б., Крашенинникова М.А. Причины и особенности долговременной изменчивости ледовитости Баренцева моря // Лед и Снег. 2019. Т. 59 (1). С. 112–122. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-112-122>
 13. Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A. Global Analyses of Sea Surface Temperature, Sea Ice and Night Marine Air Temperature since the Late Nineteenth Century // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № D 14. 4407 <https://doi.org/10.1029/2002JD002670>
 14. Золотокрылин А.Н., Михайлов А.Ю., Туткова Т.Б. Влияние притока теплых атлантических вод на аномалии климата в атлантическом секторе Арктики // Лед и снег. 2015. Т. 55. (3). С. 73–82. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-3-73-82>
 15. Artamonov Yu.V., Skripaleva E.A., Fedirko A.V. Regional Features of the Temperature Field Synoptic Variability on the Black Sea Surface from Satellite Data // Physical Oceanography. 2020. V. 27 (2). P. 186–196. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2020-2-186-196>
 16. Dickson R.R., Osborn T.J., Hurrell J.W., Meincke J., Blindheim J., Adlandsvik B., Vinje T., Alekseev G., Maslovski W. The Arctic Ocean Response to the North Atlantic Oscillation // Journal of Climate. 2000. V. 3. P. 2671–2696. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<2671:TAORTT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<2671:TAORTT>2.0.CO;2)

LARGE-SCALE FEATURES OF SYNCHRONOUS VARIABILITY OF WINTER SURFACE TEMPERATURE IN THE BARENTS AND BLACK SEA

A. A. Sizov^{a, #}, T. M. Bayankin^a, V. L. Pososhkov^a, and A. E. Anisimov^a

^a Marine Hydrophysical Institute Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russian Federation

[#]E-mail: sizov_anatoliy@mail.ru

Presented by Academician of the RAS V.M. Kotlyakov August 5, 2021

The conditions for the formation of surface temperature anomalies in the Barents and Black Seas in January–March are considered. It is shown that both interannual and interdecadal variability of the surface temperature anomaly in these seas is determined by the thermal state of the waters of the North Atlantic and occurs synchronously both in the years of negative and in the years of positive values of the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) index. At the same time, the average surface temperature anomaly of these seas is formed under the influence of atmospheric circulation in the Atlantic–European region, determined by the North Atlantic Oscillation (NAO) index. In years $NAO \geq 1$, the surface temperature of the Barents Sea is higher, and the Black Sea is lower than the climatic norm. In the years of $NAO \leq -1$, the surface temperature of the Barents Sea is lower, and that of the Black Sea is higher of the climatic normal.

Keywords: Barents Sea, Black Sea, surface temperature anomaly, Atlantic multi-decadal oscillation, North Atlantic oscillation