ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2023, том 509, № 2, с. 259–264

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.465.635 + 551.510.411.33

ФОРМИРОВАНИЕ ЗИМНИХ АНОМАЛИЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ В ДЕСЯТИЛЕТИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ И ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ИНДЕКСА СЕВЕРОАТЛАНТИЧЕСКОГО КОЛЕБАНИЯ

© 2023 г. А. А. Сизов[1,*], Т. М. Баянкина[1,], В. Л. Посошков[1]**

Представлено академиком РАН В.М. Котляковым 06.12.2022 г.
Поступило 06.12.2022 г.
После доработки 25.12.2022 г.
Принято к публикации 28.12.2022 г.

Представлен анализ изменчивости аномалии зимней поверхностной температуры в Северной Атлантике в десятилетия отрицательных и положительных значений индекса Североатлантического колебания. В десятилетие с отрицательными значениями индекса Североатлантического колебания склоновые воды системы Гольфстрим и воды Лабрадорского течения максимально понижают температуру Гольфстрима в зоне перемешивания на шельфе п-ова Скотия и в районе квазистационарного антициклонического вихря. В десятилетие с положительными значениями индекса Североатлантического колебания температура Гольфстрима близка к климатической норме. Учитывая повышенную скорость Гольфстрима в годы с положительными значениями индекса Североатлантического колебания, распространение аномалии поверхностной температуры океана по акватории Северной Атлантики происходит за более короткое время, чем в годы с его отрицательными значениями.

Ключевые слова: индекс Североатлантического колебания, склоновые воды, Гольфстрим, Лабрадорское течение, Северо-Атлантическое течение, аномалия температуры поверхности океана

DOI: 10.31857/S2686739722602824, **EDN:** NZHQSC

Основные особенности климатической изменчивости гидрометеорологических параметров в Северной Атлантике и Северном Ледовитом океане (СЛО) формируются под воздействием процессов, определяемых Арктическим колебанием (АК) [1]. Североатлантическое колебание (САК) – проявление АК в Атлантико-Европейском секторе. Оба индекса значимо коррелированы ($r^2 = 0.85$) [2]. В положительную фазу индексов АК и САК, из СЛО через пролив Фрама в Северную Атлантику выносится больше распресненной и холодной воды, чем в отрицательную фазу этих индексов [3]. Одновременно с этим меняются скорость Гольфстрима и широтное положение его северной границы в районе 50–70° з.д. [4, 5], а следовательно, и перенос вод системой Северо-Атлантического течения (САТ) в регионы Северной Атлантики. Часть этих вод поступает в район северо-восточного фланга Субполярного циклонического круговорота (СЦКв), на западном фланге которого располагается Лабрадорское течение, переносящее холодные и распресненные воды в район Большой Ньюфаундлендской банки [6]. В этом районе воды Лабрадорского течения смешиваются с водами системы Гольфстрим [1, 4].

Известно, что в десятилетия 1960-х годов индекс САК был преимущественно отрицательным, а в 1970-х–1990-х годах положительным [1, 7].

Целью работы является исследование процесса формирования аномалии зимней поверхностной температуры Северной Атлантики в десятилетия преобладания отрицательных и положительных значений индекса САК.

Район исследования Северной Атлантики ограничивался координатами 30–75° с.ш., 0–75° з.д. Аномалии поверхностной температуры по этому району выбирались из массива Hadley Centre for Climate Prediction and Research (URL: https:www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/). Аномалия температуры поверхности океана (АТПО) рассчитывалась относительно климатического ряда за 1991–2020 гг.

Индексы АК и САК выбирались из архива Northern Hemisphere Teleconnection Patterns http://www/.cpc.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml.

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

Таблица 1. Индексы атмосферной циркуляции (САК, ИГ) и гидрометеорологические характеристики системы Гольфстрим и субполярного циклонического круговорота

Параметры	Отрицательная фаза индекса САК 1956–1970 гг.	Положительная фаза индекса САК 1986–1995 гг.
САК (январь–март)	–1.13	0.4
ИГ (январь–март)	–0.43	0.31
СЦКв, Св	21.0	20.3
СЦКз, Св	11.1	9.7
АТПО, °С (январь–март)	–1.30	0.06

Индекс Гольфстрима размещен на сайте http://web.pml.ac.uk/gulfstream/data.htm. Оценка расхода вод на восточном и западном флангах СЦК проводилась по материалам статьи [6].

Средние за январь–март значения индекса САК позволяли выбрать группы лет с преобладанием отрицательных и положительных значений этого индекса. Для анализа были выбраны следующие группы лет: с отрицательными значениями индекса САК (1956–1970 гг.) и положительными значениями (1986–1995 гг.). По этим группам лет проводились оценки средних величин АТПО, сдвига северной границы Гольфстрима – индекс Гольфстрима (ИГ) и переноса водных масс в системе СЦК. Оценка изменчивости АТПО выполнялась по региону, ограниченному координатами 38–42° с.ш., 65–70° з.д. Этот регион характеризовался максимальной изменчивостью ИГ [5], оценки которых показаны в табл. 1.

В табл. 1, в строках СЦКв и СЦКз обозначен перенос водных масс на север и юг в системе СЦК на его восточном и западном флангах в Св (1 Св = $= 10^6$ м^3 с$^{-1}$).

Как следует из табл. 1, в десятилетие отрицательных значений индекса САК северная граница Гольфстрима смещается на юг (индекс ИГ) [5]. При этом, как показано в [8], уменьшается перенос вод в системе Гольфстрим. В то же время, как следует из [6], теплые и соленые воды САТ следуют в северо-восточном направлении и формируют восточный фланг СЦКв. По оценкам этих авторов, перенос водных масс на восточном фланге СЦКв составляет около 21 Св. Перенос вод на западном фланге СЦКз (Лабрадорское течение) примерно в два раза меньше – 11.1 Св. Отметим, что в формировании термохалинных характеристик Лабрадорского течения принимают участие воды Восточно-Гренландского течения. Согласно [3], в годы отрицательных значений индексов АК и САК, Восточно-Гренландское течение выносит из Арктического бассейна меньше холодных и распресненных вод, чем в годы положительных значений этих индексов. Это может приводить к ослаблению стратификации верхнего слоя океана в районе СЦК, содействуя глубокой конвекции [3]. С другой стороны, как следует из [6], в десятилетие положительных значений индекса САК поток теплых и соленых вод Северо-Атлантического течения на восточном фланге СЦКв уменьшался на 0.7 Св, а на западном фланге этого круговорота уменьшался на 1.4 Св. Таким образом, в десятилетие положительных значений индекса САК Лабрадорское течение переносило в район Большой Ньюфаундлендской банки меньше холодных и распресненных вод, чем в десятилетие отрицательных значений индекса САК. Как следует из [3], в район СЦК поступает больше холодных и распресненных арктических вод, чем в десятилетие отрицательных значений индекса САК. Это способствует усилению стратификации верхнего слоя океана, что затрудняет развитие глубокой конвекции, порождающей глубоководную ветвь Атлантической Меридиональной циркуляции (Atlantic Meridional Overturning Circulation – AMOC).

Как следует из табл. 1, междесятилетние процессы в высокоширотных районах Северной Атлантики синхронизированы с изменчивостью динамических и тепловых характеристик в системе Гольфстрим. В десятилетие положительных значений индекса САК северная граница Гольфстрима сдвигается в северном направлении [5]. В долготной полосе 50–70° з.д., по которой определяется индекс ИГ, северная граница Гольфстрима следует вдоль материкового склона, который занимает незначительную часть акватории и круто опускается в сторону океана [4]. К северу от северной границы Гольфстрима существует направленное на восток течение склоновых вод [4, 9]. Предполагается, что склоновые воды образуются вдоль левого края Гольфстрима в результате смешения шельфовых вод и центральной североатлантической водной массы [4].

Учитывая, что в десятилетие отрицательных значений индекса САК интенсивность глубокой конвекции в районе СЦК повышается, а в десятилетие положительных значений этого индекса понижается [3], можно ожидать соответственного изменения переноса водных масс в глубоководной ветви AMOC. В [4] глубоководная ветвь AMOC представляется как Глубинное западное

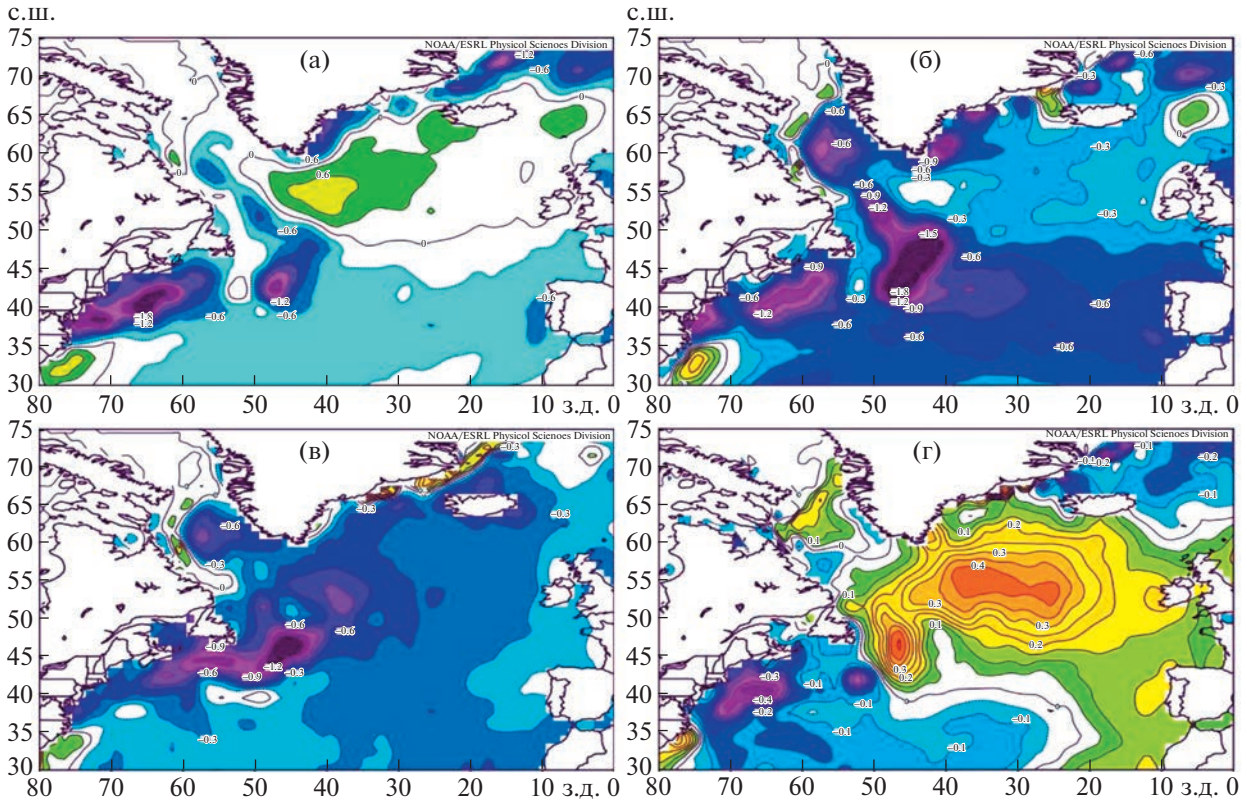

Рис. 1. Композитные карты АТПО: а – годы (1956–1970) с отрицательными значениями индекса САК; б – в последующие 15 лет (1971–1985) после десятилетия отрицательных значений САК; в – годы (1986–1995) с положительными значениями индекса САК; г – последующие 12 лет (1996–2008) после десятилетия положительных значений САК.

противотечение (ГЗПТ). К северо-востоку от мыса Гаттерас ГЗТП располагается на левом фланге Гольфстрима. Таким образом, можно предполагать, что воды ГЗТП участвуют в формировании склоновых вод за счет механизмов перемешивания в антициклонических вихрях [4] и апвеллинга [10]. Из этого следует, что в десятилетие отрицательных значений индекса САК склоновые воды могут быть более холодными, чем в десятилетие его положительных значений. Учитывая, что в десятилетие отрицательных значений индекса САК северная граница Гольфстрима сдвигается от материкового склона в сторону больших глубин, можно предположить, что будет возрастать поток аномально холодных склоновых вод. Смешиваясь с водами Гольфстрима, склоновые воды будут заметно понижать температуру последних. С другой стороны, в десятилетие положительных значений индекса САК северная граница Гольфстрима, смещаясь в сторону материкового склона, уменьшает поток склоновых вод. Следствием этого является незначительное понижение поверхностной температуры Гольфстрима. В табл. 1 этот процесс показан в строке АТПО.

Распространяясь по акватории Северной Атлантики системой течений и вихрей, аномально холодные при отрицательных значений индекса САК и аномально теплые при положительных значений этого индекса воды Гольфстрима и САТ постепенно занимают все пространство Северной Атлантики. Процесс формирования крупномасштабных аномалий поверхностной температуры представлен на композитных картах АТПО (рис. 1).

Для построения этих карт учитывалось, что АТПО Северной Атлантики (Атлантическая мультидекадная осцилляция – АМО) значимо коррелирована с САК ($r = 0.86$) при сдвиге на 15 лет [11]. Предполагалось, что процесс распространения водных масс с аномально низкими (высокими) ТПО из района с максимальной изменчивостью ИГ становится заметным на большой акватории, начиная с конца десятилетия отрицательных (положительных) значений индекса САК. Для десятилетия отрицательных значений индекса САК это был 1970 г., для десятилетия положительных значений индекса САК – 1995 г.

Рассмотрим композитные карты АТПО (рис. 1 а, б) для десятилетия отрицательных значений индекса САК (1956–1970 гг.) и за последующие 15 лет (1971–1985 гг.). Композитная карта АТПО для десятилетия положительных значений

Таблица 2. Средние значения АТПО в субрегионах Северной Атлантики

Годы	Средние значения АТПО (°С) в субрегионах							
	Ш.С., 38–42° с.ш., 65–70° з.д.	КАВ 40–44° с.ш., 45–48° з.д.	СЦКв, 53–58° с.ш., 30–35° з.д.	СЦКз 53–58° с.ш., 50–55° з.д.	ВГ 60–65° с.ш., 35–40° з.д	ЦСА 30–35° с.ш., 35–40° з.д.	КТ 30–35° с.ш., 15–20° з.д	Сарг. 30–35° с.ш., 65–70° з.д
1956–1970	–1.30	–1.06	0.49	–0.08	–0.20	–0.20	–0.21	0.07
1971–1985	–0.37	–1.24	–0.29	–0.40	–0.51	–0.31	–0.43	–0.02
1986–1995	0.00	–0.24	–0.46	–0.08	–0.21	–0.08	–0.22	0.01
1996–2008	0.06	0.54	0.42	0.20	0.27	0.12	0.26	0.13

индекса САК (1986–1995 гг.) показана на рис 1 в. Анализ межгодовой изменчивости АТПО в последующие годы дал основание предполагать, что в этом случае сигнал положительных аномалий температуры поверхности океана распространяется по акватории Северной Атлантики с большей скоростью, чем в годы отрицательных значений индекса САК.

Оценки [4] показывают, что скорость Гольфстрима между 69° и 70° з.д. в год положительных значений индекса САК превышала в 1.24 раза скорость в год его отрицательных значений. Учитывая эту оценку, на рис. 1 г представлена композитная карта АТПО за 1996–2008 гг., т.е. за последующие 12 лет после десятилетия положительных значений индекса САК.

Результаты, представленные на рис. 1, позволяют предложить следующую предварительную интерпретацию процесса междесятилетнего изменения АТПО в Северной Атлантике. Для этого были выбраны восемь характерных субрегионов: шельф п-ова Скотия (Ш.С), где склоновые воды взаимодействуют с водами Гольфстрима [1], квазистационарного антициклонического вихря (КАВ) [4], восточного (СЦКв) и западного (СЦКз) флангов субполярного циклонического круговорота, Восточно-Гренландского течения (ВГТ), центра субтропической Атлантики (ЦСА), Канарского течения (КТ) и Саргассова моря (Сарг.) Средние значения АТПО в субрегионах Северной Атлантики за выбранные десятилетия показаны в табл. 2.

В табл. 2 показано, что максимальная отрицательная аномалия температуры поверхности океана в десятилетие отрицательных значений индекса САК (1956–1970 гг.) наблюдалась в субрегионе Ш.С. – субрегионе, максимально близком к области формирования склоновых вод. Отсюда, перемешиваясь с водами Гольфстрима, эти воды поступали в субрегион квазистационарного антициклонического вихря, в котором, предположительно, происходило интенсивное перемешивание склоновых вод и вод Гольфстрима. В следующие 15 лет (1971–1985 гг.) распространения водных масс с отрицательной АТПО, в субрегионе КАВ скапливались воды с максимально низкой температурой поверхности океана.

Учитывая схемы переноса водных масс [4, 6], можно полагать, что из субрегиона КАВ часть вод Северо-Атлантического течения распространялась в северо-восточном направлении, формируя восточный фланг субполярного циклонического круговорота (СЦКв). Поэтому в десятилетие 1971–1985 гг. в этом субрегионе наблюдалась отрицательная АТПО. При этом поверхностные воды Восточно-Гренландского течения были наиболее холодными (АТПО = –0.51°С). Смешиваясь с водами восточного фланга СЦКв, они формировали воды западного фланга СЦКз (АТПО = –0.40°С). Можно предполагать, что максимально холодные воды Восточно-Гренландского течения создавали условия для интенсификации глубокой конвекции в море Ирмингера (субрегион СЦК). В этом случае направленная на юг глубоководная ветвь АМОС (ГЗПТ) могла приносить в субрегионы КАВ и САТ воды с более низкой температурой. Вовлеченные в перемешивание с вышележащими слоями, эти воды могли приводить к понижению ТПО в субрегионе КАВ и в ветви САТ, питающей водные массы восточного фланга СЦКв. По-видимому, этот процесс показан в табл. 2 в субрегионах КАВ и СЦКв в десятилетие положительных значений САК (1986–1995 гг.).

Распространение отрицательной аномалии температуры поверхности океана в южной части Северной Атлантики (рис. 1 б и табл. 2) происходило синхронно с этим процессом в его северной части. Максимальные отрицательные значения АТПО наблюдались в районе Канарского течения (КТ), несколько меньшие значения отмечались в центре субтропической Атлантики (ЦСА). В центре Саргассова моря (Сарг.) отклонения температуры поверхности океана от климатической нормы были незначительными.

В десятилетие положительных значений САК (1986–1995 гг.) в районе шельфа п-ова Скотия (Ш.С.), где наблюдалось заметное присутствие склоновых вод [1], температура поверхности океана была близка к климатической норме (рис. 1 в,

табл. 2). С учетом преобладания положительной фазы ИГ при положительном значении индекса САК [5], это могло означать прекращение поступления холодных склоновых вод в район их смешения с водами Гольфстрима. Можно полагать, что с этого момента начинался крупномасштабный переход АТПО Северной Атлантики к положительной фазе. Значительно уменьшилась отрицательная АТПО в субрегионах КАВ, СЦК, ВГТ, ЦСА, КТ (табл. 2). В последующие 12 лет (1996–2008 гг.) во всех выделенных субрегионах Северной Атлантики наблюдалась положительная аномалия температуры поверхности океана. Примечательно, что температура поверхности океана Восточно-Гренландского течения была выше климатической нормы.

В заключение отметим, что проведенный анализ позволяет предложить следующую схему междесятилетней перестройки АТПО Северной Атлантики. Циркуляция атмосферы интенсифицирует при положительном значении индекса САК или ослабляет перенос водных масс в Гольфстриме при отрицательном его значении [4, 8]. При уменьшении скорости Гольфстрима его северная граница смещается в южном направлении в сторону больших глубин [5], открывая путь для прохода холодных склоновых вод. Повышение скорости Гольфстрима сдвигает его северную границу в сторону шельфа п-ова Скотия [5], перекрывая проход холодных склоновых вод.

В формировании склоновых вод принимают участие воды Глубинного западного противотечения [4, 10], которые образуются в результате глубокой конвекции в морях Лабрадор и Ирмингера [1, 3, 6]. Глубокая конвекция интенсифицируется в годы отрицательных значений индекса САК [3]. В эти годы Гольфстрим и Северо-Атлантическое течение в результате перемешивания со склоновыми водами и водами Лабрадорского течения [1] приобретают аномально низкую температуру. Северо-восточная ветвь САТ переносит эти аномально холодные воды на восточный фланг субполярного циклонического круговорота [6]. Здесь они, перемешиваясь с водами Восточно-Гренландского течения, участвуют в формировании холодного Лабрадорского течения. Юго-Западная ветвь САТ переносит аномально холодные воды в южную половину Северной Атлантики. Распространяясь системой течений и вихрей, эти воды заполняют все пространство Северной Атлантики. По нашим оценкам длительность этого процесса составляет около 15 лет.

В годы положительных значений индекса САК, когда проход склоновых вод в районе шельфа п-ова Скотия заметно уменьшается или прекращается вовсе, воды Гольфстрима становятся аномально теплыми. Северо-восточная и юго-восточная ветви САТ [4] переносят эти теплые воды в район восточного фланга СЦКв и в южную половину Северной Атлантики соответственно. Одновременно с этим воды Восточно-Гренландского течения становятся теплее. Смешиваясь с водами восточного фланга СЦКв, эти воды повышают поверхностную температуру Лабрадорского течения, расход которого также уменьшается [6]. Ослабевает, по-видимому, и ГЗПТ, т.к. в годы положительных значений индекса САК ослабевает глубокая конвекция в море Ирмингера [3]. В результате система течений и вихрей распространяют положительную аномалию температуры поверхности океана по всей Северной Атлантике. Учитывая более высокую скорость Гольфстрима в годы положительных значений индекса САК, была сделана оценка распространения положительной аномалии температуры поверхности океана по всей акватории Северной Атлантики в течение 12 лет.

Одним из результатов такой междесятилетней изменчивости поверхностной температуры Северной Атлантики является рассмотренный в [12] процесс синхронной смены знака аномалии зимней поверхностной температуры Баренцева и Черного морей в годы положительных и отрицательных значений индексов САК и АМО.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по теме FNNN-2021-0002 “Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан–атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата” (шифр “Взаимодействие океана и атмосферы”)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Greene Ch.H., Meyer-Gutbrod E., Monger C., et al.* Remote Climate-forcing decadal-scale regime shifts in Northwest Atlantic shelf ecosysteme // Limnology and Oceanography. 2013. V. 58. № 3. P. 803–816. https://doi.org/10.4319/lo.2013.58.3.0803
2. *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/10.1916/j.jmarsys.2008.11.026
3. *Proshutinsky A., Dukhovskoy D., Timmermans M.-L. Krishfield R., Bamber J.L.* Arctic circulation regimes // Phil. Trans. R. Soc. 2015. A373:20140160. https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0160
4. *Баранов Е.И.* Структура и динамика вод системы Гольфстрим. М.: Гидрометеоиздат, 1988. 252 с.
5. *Taylor A.H., Stephens J.A.* The North Atlantic Oscillation and the latitude of the Gulf Stream // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 1998. V. 50. № 1. P. 134–142. https://doi.org/10.3402/tellusa.v50il.14517
6. *Hirschi J.-M., Barnier B., Böning C., Biastoch A., Blak A., et al.* The Atlantic Meridional Overturning Circulation

in High-Resolution Models // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2020. doi.org/ https://doi.org/10.1029/2019JC015522

7. *Нестеров Е.С.* Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: Гидрометеоиздат. 2013. 127 с.
8. *Curry R.G., McCarthy M.S.* Ocean Gyre Circulation Changes Assosiated with the North Atlantic Oscillation // Journal of Physical Oceanography. 2001. V. 31. № 12. P. 3374–3400.
9. *Fuglister F.C.* Gulf Stream '60*// Progress in oceanography. 1963. V. 1. P. 265– 383.
10. *Бондаренко А.А., Борисов В.С., Серых И.В., Суркова Г.В., Филиппов Ю.К.* Закономерности формирования апвеллинга Мирового океана // Метеорология и гидрология. 2012. № 11. С. 75–81.
11. *Breeden M.L., McKinly G.A.* Climate impacts on multidecadal pCO_2 variability in the North Atlantic: 1948–2009 // Biogeosciences. 2016. № 13. P. 3387–3396. https://doi.org/10.5194/bg-13-3387-2016
12. *Sizov A.A., Bayankina T.M., Pososhkov V.L, Anisimov A.E.* Processes Determining Synchronous Interdecadal Variability of Surface Temperature in the Barents and Black Seas // Physical Oceanography. 2022. V. 29. № 3. P. 257–270. https://doi.org/10.22449/1573-160X-2022-3-257-270

FORMATION OF WINTER SURFACE TEMPERATURE ANOMALIES IN THE NORTH ATLANTIC IN DECADES OF NEGATIVE AND POSITIVE VALUES OF THE NORTH ATLANTIC OSCILLATION INDEX

A. A. Sizov[a,#], T. M. Bayankina[a,##], and V. L. Pososhkov[a]

[a] *Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russian Federation*

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

[##] *E-mail: bayankina_t@mail.ru*

Presented by Academician of the RAS V.M. Kotlyakov December 6, 2022

An analysis of the variability of the winter surface temperature anomaly in the North Atlantic in decades of negative and positive values of the North Atlantic Oscillation Index is presented. It was found that in the decade with negative values of the North Atlantic Oscillation Index, the slope waters of the Gulf Stream system and Labrador Current waters decrease the temperature of the Gulf Stream at the mixing zone on the Scotia Peninsula shelf and in the area of the quasistationary anticyclonic vortex to a maximum. In the decade with positive values of the North Atlantic Oscillation Index, the temperature of the slope waters is close to the climate. Taking into account the increased speed of the Gulf Stream in the years with positive values of the North Atlantic Oscillation Index, the spreading of the surface ocean temperature anomaly over the North Atlantic water area occurs for a shorter time than in the years with its negative values.

Keywords: North Atlantic Oscillation Index, slope waters, Gulf Stream, Labrador Current, North Atlantic Current, ocean surface temperature anomaly