

Влияние арктической осцилляции на формирование режимов циркуляции вод в секторе Северного, Норвежского и Баренцева морей

Е. Е. Лемешко*, Е. М. Лемешко, В. П. Новицкая

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**e-mail: e.lemeshko@mhi-ras.ru*

Поступила 20.03.2021 г.; принята к публикации 28.04.2021 г.; опубликована 25.06.2021 г.

Статья посвящена изучению влияния ветрового воздействия, характерного для арктической осцилляции, на режимы циркуляции вод в секторе Мирового океана (65° – 81.5° с. ш., 0° – 70° в. д.), объединяющего Северное, Норвежское и Баренцево моря. Цель исследования заключается в установлении количественных закономерностей изменчивости уровня океана и скоростей поверхностных геострофических течений в зависимости от величины индекса арктической осцилляции. В целом отклик уровня моря, осредненного по рассматриваемому сектору океана, находится в противофазе с этим индексом. Однако выделяются периоды расогласования противофазных колебаний уровня моря и индекса арктической осцилляции. После 2009 г. отмечается увеличение амплитуды и уменьшение длительности фаз индекса арктической осцилляции. Разница между областями положительных и отрицательных значений аномалий уровня моря создает градиент давления, который вызывает поверхностные геострофические течения, несущие атлантические воды вдоль кромки шельфа в восточном направлении при циклоническом режиме (индекс арктической осцилляции больше 0) и в западном направлении при антициклоническом режиме (индекс меньше 0). В статье получены оценки коэффициентов линейной регрессии: для уровня моря они составляют ~ 2 см в шельфовой зоне и приблизительно -1 см в глубоководной части сектора. Таким образом, перепад уровня между шельфом и более глубоководной частью рассматриваемой акватории равен ~ 3 см на 1 единицу индекса арктической осцилляции. Оценки коэффициентов линейной регрессии для аномалий скорости геострофических течений составили ~ 0.5 см/с на 1 единицу индекса. Анализ долговременной изменчивости стерической компоненты уровня океана показал лучшую взаимосвязь с межгодовой изменчивостью индекса арктической осцилляции по сравнению с уровнем океана.

Ключевые слова: Северное море, Норвежское море, Баренцево море, альтиметрия, стерический уровень, арктическая осцилляция, режимы циркуляции океана.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60083.

© Лемешко Е. Е., Лемешко Е. М., Новицкая В. П., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Для цитирования: Лемешко Е. Е., Лемешко Е. М., Новицкая В. П. Влияние арктической осцилляции на формирование режимов циркуляции вод в секторе Северного, Норвежского и Баренцева морей // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 2. С. 47–64. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-47-64

Influence of the Arctic Oscillation on the Formation of Water Circulation Regimes in the Sector of the North, Norwegian and Barents Seas

E. E. Lemeshko*, E. M. Lemeshko, V. P. Novitskaya

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

*e-mail: e.lemeshko@mhi-ras.ru

Submitted 20.03.2021; revised 28.04.2021; published 25.06.2021

The article studies the influence of wind forcing associated with the Arctic Oscillation on the water circulation regimes in the sector of the World Ocean (65° – 81.5° N, 0° – 70° E), which consolidates the North, Norwegian and Barents Seas. The study aims at establishing quantitative patterns of variability of the ocean level and surface geostrophic current velocities depending on the value of the Arctic Oscillation index. In general, the response of the sea level averaged over the ocean sector under consideration is in an antiphase with this index. However, there are periods of mismatch between antiphase fluctuations of the sea level and the Arctic Oscillation index. After 2009, an increase in the amplitude and a decrease in the duration of the phases of the Arctic Oscillation index are noted. The difference between the areas of positive and negative values of sea level anomalies creates a pressure gradient that causes surface geostrophic currents carrying Atlantic waters along the shelf edge eastward in a cyclonic regime (the Arctic Oscillation index is greater than 0) and westward in an anticyclonic regime (the index is less than 0). The article provides estimates of the linear regression coefficients: for the sea level they are ~ 2 cm in the shelf zone and about minus 1 cm in the deep-water part of the sector. Thus, the level difference between the shelf and the deeper part of the considered water area is ~ 3 cm per 1 unit of the Arctic Oscillation index. Estimates of the linear regression coefficients for anomalies of the geostrophic currents velocity were ~ 0.5 cm/s per 1 unit of the index. Analysis of the long-term variability of the steric component of the ocean level showed a better relationship with the interannual variability of the Arctic Oscillation index as compared to the ocean level.

Keywords: North Sea, Norwegian Sea, Barents Sea, altimetry, steric level, Arctic Oscillation, ocean circulation modes.

Acknowledgements: the work was funded by the RFBR under research project no. 18-05-60083.

For citation: Lemeshko, E.E., Lemeshko, E.M. and Novitskaya, V.P., 2021. Influence of the Arctic Oscillation on the Formation of Water Circulation Regimes in the Sector of the North, Norwegian and Barents Seas. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 47–64. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-47-64 (in Russian).

Введение

По данным экспедиционных исследований, наиболее резкие изменения в Северном Ледовитом океане (СЛО) произошли в 2010-е гг. В Баренцевом море они проявились в повышении температуры и солености в его северной

и северо-восточной частях [1]. При этом в Баренцевом море уменьшилась площадь морского льда, что в значительной степени вызвано увеличением притока атлантических вод, модулируемым крупномасштабным атмосферным воздействием. Сокращение площади морского льда, в свою очередь, приводит к интенсификации вертикального перемешивания и возрастанию поступления тепла в атмосферу. Нагревание атмосферы в этом регионе играет важную роль в тепловом бюджете Арктики и усиливает процесс арктического усиления (повышение температуры воздуха в Арктике) [2].

Изменчивость ветрового воздействия влияет на развитие поверхностных течений и адвекцию теплых атлантических водных масс в СЛО. Поле ветра обусловлено пространственно-временной изменчивостью атмосферного давления над Атлантикой. Характерные особенности поля ветра описываются климатическими индексами: над Атлантикой Североатлантическим колебанием, над Арктикой арктической осцилляцией (АО) и арктическим диполем.

АО модулирует приток теплых атлантических и тихоокеанских вод через Берингов пролив. Во время положительной фазы АО центральная часть Арктики занята циклоном, который способствует притоку теплых вод (положительные аномалии расходов течений в Баренцевом море) и затрудняет распространение вод через Берингов пролив (отрицательные аномалии расходов). Во время отрицательной фазы АО над Арктикой находится антициклоническая область давления и знак аномалии расхода течений меняется на противоположный [3].

На основе численного моделирования в работе [4] впервые было показано существование двух режимов циркуляции океана как отклика на циклоническую/антициклоническую циркуляцию атмосферы, выделяемую по положительной/отрицательной фазе индекса АО. В этой же работе был предложен индекс арктической океанической осцилляции, определяющий тип (циклонический или антициклонический) режима циркуляции в СЛО и интенсивность дрейфовых течений.

В 1950–2000 гг. эти режимы чередовались в виде квазиколебаний в среднем с периодичностью 3–7 лет. Однако после 2000 г. наблюдаются отклонения от этой схемы. Предположительно, расплеснение СЛО, вызванное таянием гренландских ледников, способствует более длительным антициклоническим режимам [5]. В результате возможно возникновение обратных связей в климатической системе Арктики, которые в дальнейшем приведут к похолоданию. В итоге увеличится площадь и толщина ледникового покрова и произойдет возврат к климатическим условиям, которые наблюдались в 1970-х гг. [5].

Исследования показали, что общая циркуляция СЛО представляет собой суперпозицию течений, несущих теплые атлантические воды в СЛО, и двух крупномасштабных структур глубоководной части СЛО – Трансарктического течения и круговорота Бофорта. Дополнительно на динамику поверхностных течений оказывает влияние ветер, взаимодействие океана и ледового покрова, вариации потоков плавучести [6].

В Арктике наблюдается недостаток или полное отсутствие океанологических измерений в отдельных районах. Ледовый покров ограничивает использование современных буев-профилемеров типа *Argo* и осложняет развитие наблюдательных систем в Арктическом бассейне [7]. Однако стали

доступны современные спутниковые данные и продукты атмосферных ре-анализов в виде массивов геофизической и метеорологической информации в узлах регулярной сетки для всего СЛО.

Данная статья посвящена исследованию режимов циркуляции в секторе Мирового океана (65° – 81.5° с. ш., 0° – 70° в. д.), объединяющем Северное, Норвежское, Баренцево моря (далее – сектор СНБ), и установлению количественных закономерностей между уровнем моря, скоростью поверхностных геострофических течений и индексом АО.

Данные и методы

За последнее десятилетие достигнут прогресс в обработке альтиметрической информации для Арктики, а запуск спутников *Envisat* и *CryoSat-2* позволил увеличить площадь покрытия океана в высоких широтах до 88° с. ш. и повысить точность измерений аномалий уровня моря [8]. Сравнение данных альтиметрии с измерениями уровня моря на береговых мареографах показало их высокую коррелированность: средний коэффициент корреляции для Баренцева моря в периоды открытой воды составил 0.89 [3], для Норвежского моря – в среднем 0.86 [8]. Поэтому новые данные альтиметрии как для покрытых льдом районов СЛО, так и для открытой акватории позволили получить оценки динамической топографии для СЛО южнее 81.5° с. ш. как отклонений от поверхности геоида:

$$H_{DT} = H_{SSH} - H_G,$$

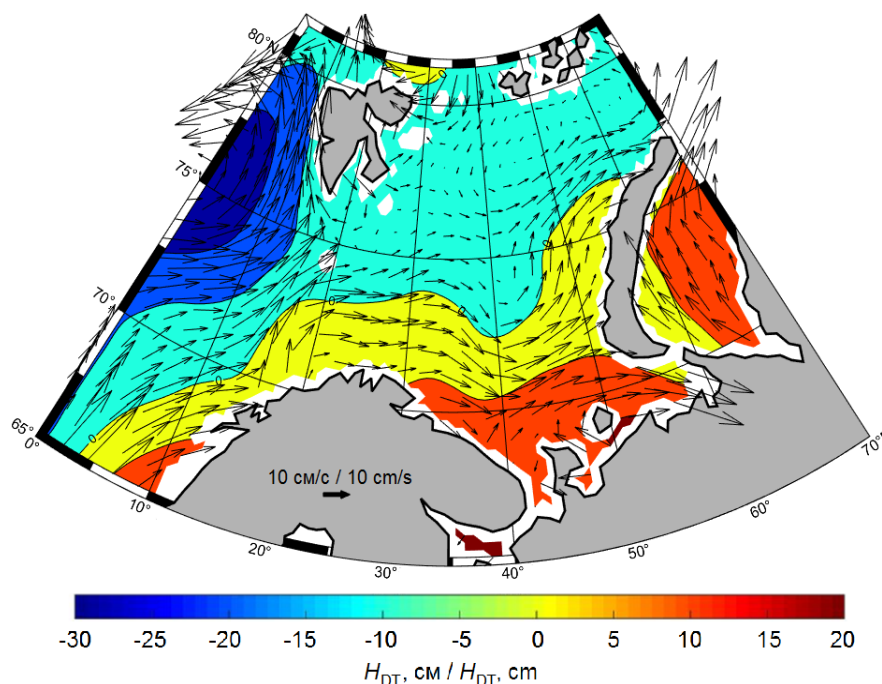
где H_{DT} – динамическая топография океана; H_{SSH} – высота морской поверхности; H_G – высота поверхности геоида [8]. Для расчета поверхностных геострофических скоростей использовались данные динамической топографии океана H_{DT} [8].

В статье использовались месячные данные динамической топографии океана и поверхностных геострофических скоростей за 2003–2014 гг., предоставленные *Centre for Polar Observation and Modelling, University College London* (URL: www.cprom.ucl.ac.uk/dynamic_topography), на сетке $0.75^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ [9, 10]. Данные динамической топографии океана и геострофических скоростей были выбраны для сектора СНБ – основного пути адвекции атлантических вод в Баренцево море.

Результаты

Для сектора СНБ были рассчитаны средние значения динамической топографии и поверхностных геострофических скоростей за 2003–2014 гг. и построена карта (рис. 1), которая соответствует известной картине течений в данном секторе¹⁾ (Норвежское течение, Норвежское Прибрежное течение и Западно-Шпицбергенское течение). Средние значения скоростей течений за указанный период составляют ~ 10 и ~ 15 см/с в районе западнее Шпицбергена и у Новой Земли, перепад уровня между шельфом и глубоководной частью бассейна достигает 30 см (рис. 1).

¹⁾ Атлас Арктики / Ред. А. Ф. Трешников. М. : Главное управление геодезии и картографии, 1985. 204 с.



Р и с . 1 . Средние за 2003–2014 гг. значения динамической топографии H_{DT} и поверхностных геострофических скоростей (стрелки) для сектора СНБ по данным альтиметрии

Fig . 1 . Averaged values for 2003–2014 of dynamic topography H_{DT} and surface geostrophic velocities (arrows) for the North, Norwegian and Barents Seas (NNB) sector according to the altimetry data

Было установлено, что поверхностные геострофические скорости, рассчитанные по динамической топографии, находятся в достаточно хорошем соответствии с данными измерений течений на автономных буйковых станциях. Например, для района моря Бофорта среднеквадратичные отклонения разницы значений модуля геострофических скоростей по данным альтиметрии и измерений скоростей на автономных буйковых станциях за 2005–2008 гг. составили $\sim 1\text{--}2$ см/с, а СКО разницы значений по углу – около 60° [10].

Осредненные по сектору СНБ аномалии уровня как отклонения от среднемноголетних значений, представленных на рис. 1, после удаления внутрисезонных колебаний фильтром скользящего среднего с шириной окна 12 месяцев и нормировки на значение СКО, равное 3.3 см, приведены на рис. 2. Положительные значения аномалий уровня моря указывают на антициклонический режим циркуляции в данном секторе СЛО (в 2006–2007 гг., 2009–2012 гг.), а отрицательные аномалии уровня – на циклонический режим (в 2005, 2008, 2014 гг.). В целом за 2003–2014 гг. максимальная длительность антициклонического режима в секторе СНБ составила ~ 3.5 года – в 2009–2013 гг. (рис. 2).

В поле приземного атмосферного давления в 2003–2014 гг. выделяются циклонический режим циркуляции приземной атмосферы во время положительной фазы индекса АО и антициклонический режим – во время

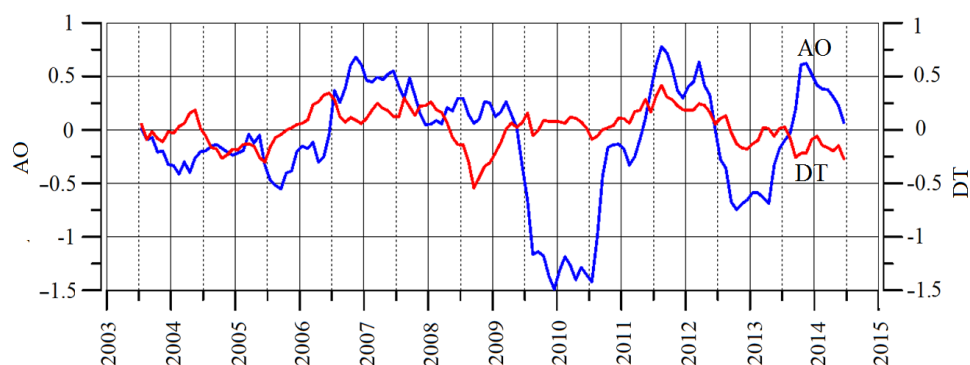


Рис. 2. Средние по сектору СНБ нормированные аномалии уровня по данным альтиметрии (DT) и нормированный индекс арктической осцилляции (АО) после фильтрации скользящим средним с шириной окна 12 месяцев

Fig. 2. Average for the NNB sector normalized level anomalies according to the altimetry data (DT) and normalized Arctic Oscillation (AO) index filtered with the 12 month moving average filter

отрицательной фазы АО (рис. 2). Индекс АО представляет собой первую главную компоненту в разложении суточных полей геопотенциала на высоте 1000 гПа по эмпирическим ортогональным функциям для области 20° – 90° с. ш. В статье использовались данные индекса АО, предоставленные *NOAA/NWS Climate Prediction Center, USA* ²⁾.

Отметим, что наблюдается соответствие режимов циркуляции атмосферы и океана. Индекс АО и средние по сектору СНБ нормированные аномалии уровня по данным альтиметрии (DT) на графиках рис. 2 находятся в противофазе в 2004, 2006, 2008, 2009–2011, 2014 гг. В остальные периоды в этом секторе отмечается рассогласование фаз колебаний аномалий уровня моря и индекса АО: их значения приобретают одинаковый знак (рис. 2). Во время положительной фазы индекса АО, когда в Арктике наблюдается циклоническая циркуляция атмосферы, в секторе СНБ выделяются положительные аномалии среднего уровня моря, как, например, в 2007, 2012 гг., что соответствует антициклонической циркуляции океана (рис. 2). И наоборот, во время отрицательной фазы индекса АО, когда над Арктикой находится антициклоническая область давления, в секторе СНБ выделяются отрицательные аномалии уровня моря, как в 2005 и 2013 гг. (рис. 2), что соответствует циклонической циркуляции океана (рис. 2). Такие рассогласования на масштабах всего СЛО отмечаются и на более длительных периодах [2].

Детальный анализ синоптических ситуаций над СЛО на основе построения самоорганизующихся карт приземного давления (карты Кохонена) ранее выявил шесть типов атмосферной циркуляции (два антициклонических типа, один циклонический тип и три смешанные формы) [11], что дает более детальную, по сравнению с АО, картину распределения приземного

²⁾ URL: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml (дата обращения: 30.05.2021).

атмосферного давления над Арктикой. Вариации потоков теплых атлантических вод в Баренцево море, которые трассировались по картам поверхностной температуры воды и площади морского льда, меняются в зависимости от выделенных типов циркуляции [11]. В результате было отмечено повышение приземной температуры воздуха в северо-восточной части Баренцева моря, оценки коэффициентов линейного тренда составили 0.18 °С/год [11].

В статье также анализируется стерическая компонента уровня моря для рассматриваемого сектора. Коэффициент корреляции уровня моря по данным альтиметрии со стерической компонентой уровня моря в среднем составляет ~0.9 [10]. Стерический уровень рассчитывался по среднемесячным гидрологическим данным температуры и солёности из архива *UDASH* (*Unified Database for Arctic and Subarctic Hydrography*) [12], интерполированным на стереографическую сетку 50 × 50 км и на горизонты по глубине по следующим формулам³⁾:

$$H_{\text{Sth}}^T = \int_{z_1}^{z_2} \alpha(z) T'(z) dz,$$

$$H_{\text{Sth}}^S = - \int_{z_1}^{z_2} \beta(z) S'(z) dz,$$

$$T'(z) = T(z) - \bar{T},$$

$$S'(z) = S(z) - \bar{S},$$

$$\alpha(z) = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho(z)}{\partial T},$$

$$\beta(z) = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho(z)}{\partial S},$$

$$H_{\text{Sth}} = H_{\text{Sth}}^T + H_{\text{Sth}}^S,$$

где H_{Sth} – стерический уровень; H_{Sth}^T – термостерическая компонента уровня; H_{Sth}^S – халостерическая компонента уровня; а в качестве \bar{T} , \bar{S} обычно принимаются климатические средние значения температуры и солёности воды.

В океанологии традиционно изучались в основном стерические колебания уровня, обусловленные сезонным ходом температуры и солёности, однако изменения плотности воды вызываются и неперидическими процессами, например, распреснением из-за таяния ледников Гренландии. С появлением спутниковых данных альтиметрии об уровне моря и данных гравиметрии *GRACE* интерес к изучению стерического уровня моря усилился, поскольку это делает возможной независимую валидацию спутниковых данных

³⁾ Архипкин В. С., Добролюбов С. А. Океанология : физические свойства морской воды. М. : МАКС Пресс, 2005. 214 с.

GRACE для районов с хорошей обеспеченностью гидрологическими измерениями температуры и солености воды [13–15].

Для расчета стерического уровня были выбраны реперные значения температуры ($\bar{T} = 0$ °C) и солености ($\bar{S} = 35$ епс), которые обеспечивали в основном положительные значения температурных и халинных компонент стерического уровня [15]. В нашей работе анализировались аномалии стерического уровня, осредненного по выбранному сектору СНБ. Поэтому выбор реперных значений не оказывает влияния на амплитуду стерических колебаний, представленных на рис. 3. Поскольку коэффициенты термического расширения ($\alpha > 0$) и соленостного сжатия ($\beta > 0$) положительны в широком диапазоне температуры, солености и давления, при повышении температуры из-за термического расширения H_{Sth}^T растет, а при увеличении солености халостерическая компонента стерического уровня H_{Sth}^S уменьшается.

На рис. 3 приведены аномалии H_{Sth} стерического уровня и его компонент H_{Sth}^S , H_{Sth}^T для сектора СНБ и индекс АО после фильтрации скользящим средним с шириной окна 12 месяцев. Основной вклад в долговременную изменчивость стерического уровня вносит его халостерическая компонента (рис. 3). По синхронным минимальным понижениям халостерического уровня и максимальным повышениям термостерического уровня в 2005–2007 и в 2013–2014 гг. можно сделать вывод об увеличении поступления атлантических вод в сектор СНБ в эти периоды (рис. 3).

При сравнении рис. 2 и 3 видно, что рассогласование режимов циркуляции атмосферы (отрицательная или положительная фаза индекса АО) и циркуляции океана (положительные или отрицательные значения аномалий уровня океана) значительно уменьшилось. Для стерической компоненты уровня моря, которая характеризует бароклинную циркуляцию океана, в период положительной (циклонической) фазы индекса АО отмечалось лучшее согласование с циклоническим режимом циркуляции океана, как, например, в 2007 г. (рис. 3). И наоборот, для отрицательной (антициклонической) фазы

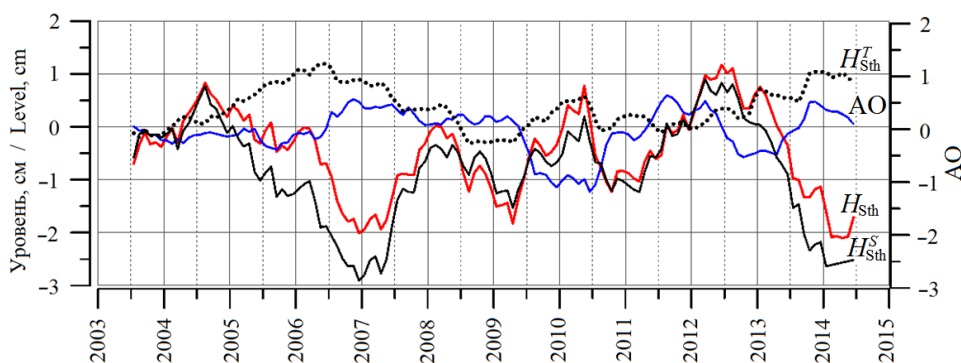


Рис. 3. Средние по сектору СНБ аномалии стерического уровня H_{Sth} и его халостерической H_{Sth}^S и термостерической H_{Sth}^T компоненты; индекс АО после фильтрации скользящим средним с шириной окна 12 месяцев

Fig. 3. Average for the NNB sector anomalies of the steric level H_{Sth} and its halosteric and thermosteric components; AO index filtered with the 12 month moving average filter

индекса АО отмечался положительный стерический уровень (рис. 3), соответствующий антициклонической циркуляции океана, как, например, в 2012 г. Отметим, что при сравнении индекса АО с аномалиями уровня моря отмечалось рассогласование режимов циркуляции атмосферы и океана в указанные периоды 2007 и 2012 гг. (рис. 2).

Улучшение соответствия режимов циркуляции атмосферы и океана при использовании индекса АО и стерической компоненты уровня связано с тем, что уровень моря H состоит из суммы стерического уровня H_{Sth} , обусловленного изменениями плотности морской воды, и баристатического уровня H_{Barh} , обусловленного вариациями водной массы столба жидкости, при этом их характерные временные масштабы изменчивости разные [16, 17]:

$$H = H_{\text{Sth}} + H_{\text{Barh}}. \quad (1)$$

Характеристики пространственной многолетней изменчивости уровня моря и стерической компоненты уровня близки: области положительных значений коэффициентов линейного тренда, равных ~ 1 мм/год, у них почти совпадают в западной части сектора ЧНБ (0° – 50° в. д.). В северо-восточной части Баренцева моря и в Карском море коэффициенты линейного тренда уровня моря отрицательны и приблизительно равны -2 мм/год. Следует отметить область (5° – 20° в. д.; 60° – 70° с. ш.) у Скандинавии, где проходит Норвежское течение, там значения коэффициентов тренда уровня моря составляют около -1 мм/год, а значения тренда стерической компоненты уровня достигают $-4 \dots -5$ мм/год [13, 15]. Таким образом, согласно выражению (1), тренд баристатической компоненты уровня моря в этой области положителен и составляет $\sim 3 \dots 4$ мм/год, что подтверждается прямыми расчетами тренда баристатического уровня по данным спутника *GRACE* (см. рис. 4 в работе [14, с. 36]). В областях поступления пресных вод, обусловленных таянием ледников Гренландии и влиянием глубокой конвекции, характерной для зимнего периода, тренды стерических колебаний велики и составляют 5.7 мм/год для Лабрадорского моря, 3.7 мм/год для моря Ирмингера и 8.1 мм/год для района с координатами 58° – 62° с. ш., 33° – 40° з. д. [13].

Процессы изменчивости баристатического уровня в Норвежском и Баренцевом морях имеют в основном внутрисезонный характер, и их вклад достигает 80 % от общей дисперсии баристатического уровня [14]. Следовательно, баротропный отклик уровня моря на ветровое воздействие имеет масштаб нескольких месяцев и может маскироваться более долговременной изменчивостью стерического уровня. В статьях [16–18] на основе анализа данных *GRACE* и численного моделирования было получено, что вариации баристатического уровня моря имели высокую корреляцию с аномалиями поля ветра для рассматриваемого сектора на внутрисезонных масштабах.

Чтобы оценить внутрисезонный отклик уровня и поверхностной геострофической скорости на ветровое воздействие, из исходных данных в каждом узле сетки удалялись фильтрацией межгодовая изменчивость и сезонный ход. Аналогично из индекса АО устранялись низкочастотный сигнал и сезонный ход. Эта процедура убирала также сезонную коррелированность ряда индекса АО с полями уровня моря и скоростей. Затем подготовленные таким образом аномалии полей осреднялись по периодам положительной ($AO > 0$)

и отрицательной ($AO < 0$) фазы индекса АО. На рис. 4 представлены композитные карты аномалий уровня и поверхностных геострофических скоростей, полученные описанным выше способом.

В период, когда индекс АО находится в положительной фазе, центральную часть сектора СНБ занимает циклоническая область с отрицательными значениями аномалий уровня до -3 см (рис. 4, *a*). Нулевая изолиния уровня соответствует примерно изобате 300 м, а в южной части Баренцева моря и в Карском море выделяются положительные аномалии уровня до 3 см (рис. 4, *a*). Аномалии скоростей (~ 1 см/с) соответствуют циклоническому режиму циркуляции.

На рис. 4, *a* выделяются Западно-Шпицбергенское течение и циклонический круговорот западнее Шпицбергена, Норвежское и Норвежское Прибрежное течение и далее течения в Баренцевом и Карском морях. В период, когда АО находится в отрицательной фазе, центральную часть сектора СНБ занимает антициклоническая область с положительными значениями аномалий уровня до 1 см. Нулевая изолиния уровня соответствует примерно изобате 500 м, а в южной части Баренцева моря и в Карском море выделяются отрицательные аномалии уровня до $-2 \dots -4$ см (рис. 4, *b*). Аномалии скоростей соответствуют антициклоническому режиму циркуляции, который охватывает южную часть сектора СНБ, антициклонический круговорот западнее Шпицбергена и Карское море (рис. 4, *b*).

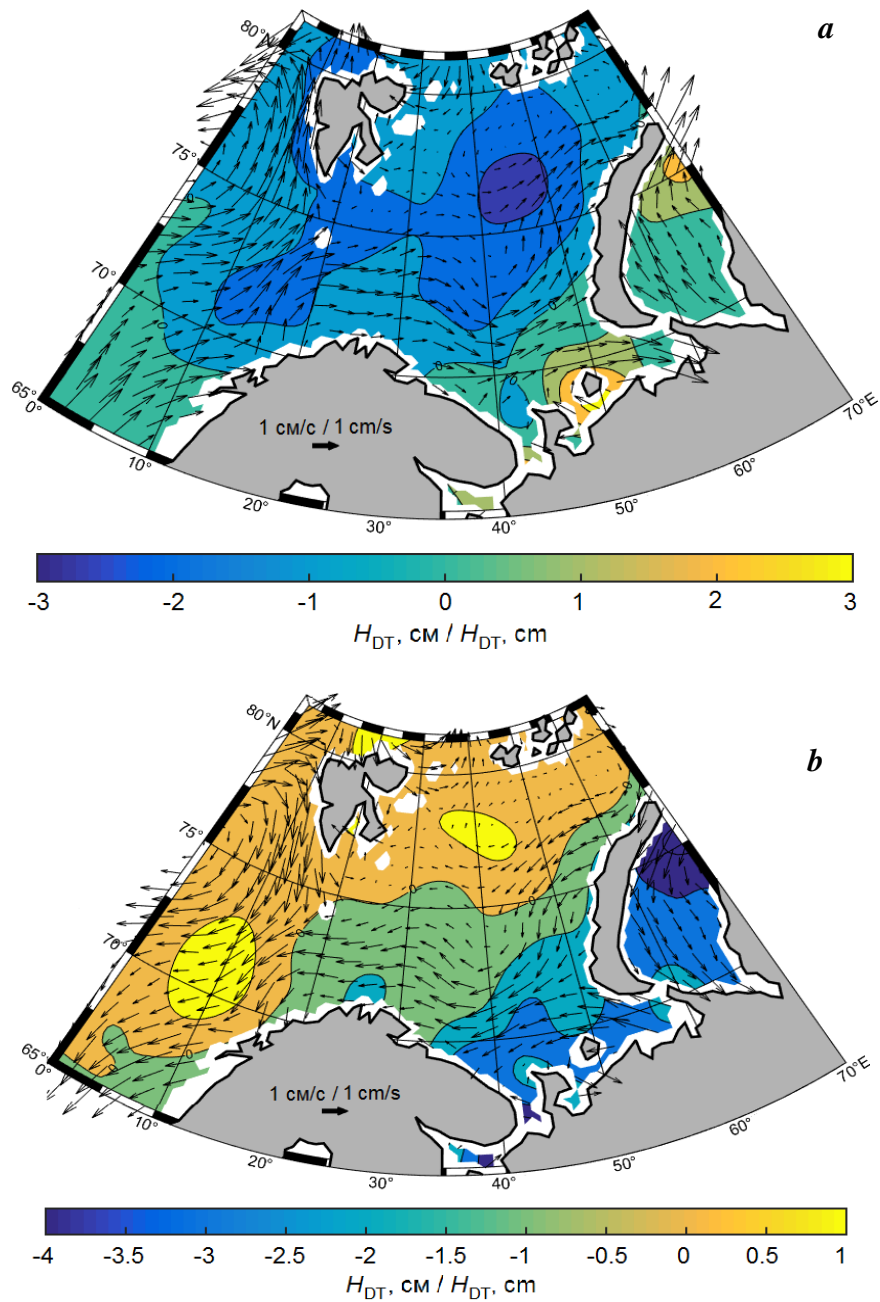
Для количественного оценивания влияния индекса АО на изменчивость аномалий уровня моря H_{DT} и поверхностных геострофических скоростей U, V использовался линейный регрессионный анализ [19]:

$$\begin{aligned} H_{DT}^i &= \alpha_{DT}^i \cdot AO + \varepsilon_{DT}^i, \\ U^i &= \alpha_U^i \cdot AO + \varepsilon_U^i, \\ V^i &= \alpha_V^i \cdot AO + \varepsilon_V^i, \end{aligned} \quad (2)$$

где коэффициенты регрессии для уровня α_{DT}^i , см, и компонент скоростей α_U^i, α_V^i , см/с, оценивались в каждом i -м узле сетки, а $\varepsilon_{DT}^i, \varepsilon_U^i, \varepsilon_V^i$ представляют собой некоррелированный белый шум. На рис. 5 приведены коэффициенты регрессии уровня моря в виде изолиний и соответствующие коэффициенты модуля скорости течений в виде векторов α_{modV}^i :

$$\alpha_{modV}^i = [(\alpha_U^i)^2 + (\alpha_V^i)^2]^{1/2}. \quad (3)$$

Пространственное распределение коэффициентов линейной регрессии уровня моря и поверхностных скоростей соответствует циклоническому режиму циркуляции в рассматриваемом секторе при положительных значениях индекса АО согласно выражению (2) (рис. 5) и, таким образом, согласуется с распределением уровня моря и скоростей для положительной фазы индекса АО (см. рис. 4, *a*). Аналогично, для отрицательной фазы индекса АО распределение коэффициентов линейной регрессии уровня моря и поверхностных скоростей дает антициклоническую картину циркуляции и согласуется с картой средних за отрицательную фазу индекса АО значений уровня моря и скоростей течений (см. рис. 4, *b*).



Р и с . 4 . Аномалии уровня моря H_{DT} , осредненные по фазам индекса АО: *a* – циклонический режим циркуляции для положительной фазы индекса АО; *b* – антициклонический режим циркуляции для отрицательной фазы индекса АО. Скорости течений приведены в виде векторов

Fig. 4. Anomalies of the sea level H_{DT} averaged by AO index phases: *a* – cyclonic circulation regime for the AO index positive phase; *b* – anticyclonic circulation regime for the AO index negative phase. The current velocities are given as vectors

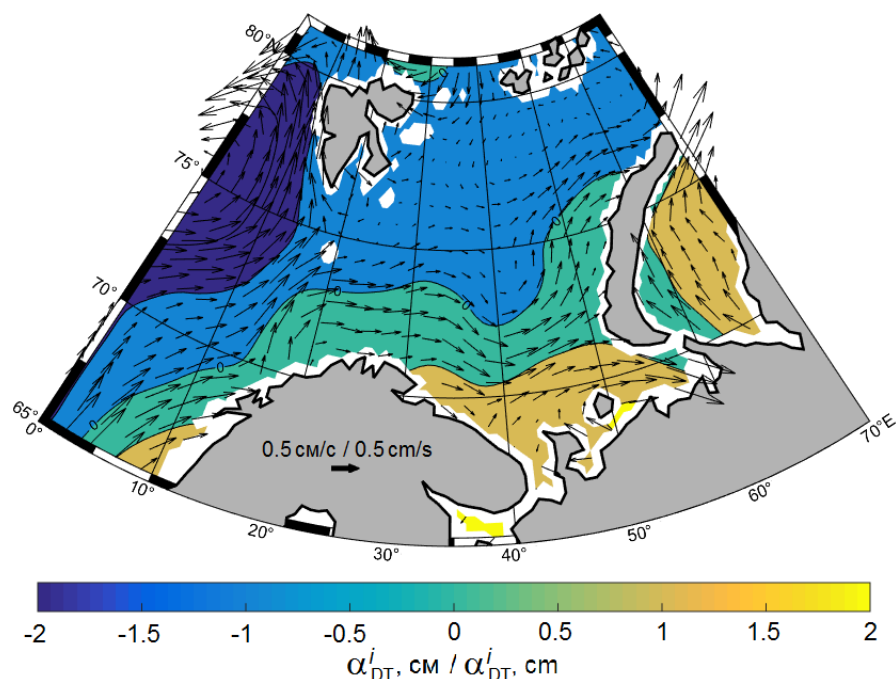


Рис. 5. Пространственное распределение коэффициентов линейной регрессии для аномалий уровня моря α_{DT}^i , см, и для аномалий скорости течений α_{modV}^i , см/с, в виде векторов за 2003–2014 гг.

Fig. 5. Spatial distribution of linear regression coefficients for sea level anomalies α_{DT}^i , cm, and current velocity anomalies α_{modV}^i , cm/s, given as vectors for 2003–2014

Обсуждение

Важность изучения влияния ветрового воздействия, характерного для АО, на режимы циркуляции вод обусловлена тем, что АО модулирует приток теплых атлантических вод в сектор СНБ. Кроме того, вдольбереговой ветер, преобладающий во время отрицательной фазы АО, вызывает кросс-шельфовый экмановский перенос льда и пресноводного стока рек, а также увеличение перепада баротропного уровня между шельфом и глубоководной частью бассейна СЛО.

Следует отметить увеличение амплитуды и уменьшение длительности отрицательной фазы индекса АО после 2009 г. (см. рис. 2). Аномалии уровня моря, осредненные по рассматриваемому сектору СНБ после фильтрации скользящим средним с шириной окна 12 месяцев, в целом находятся в противофазе с индексом АО. Однако были выделены периоды рассогласования противофазных колебаний уровня моря и индекса АО (см. рис. 2). Отметим, что средние по сектору СНБ аномалии стерической компоненты уровня моря находятся в противофазе с индексом АО почти без рассогласования фазы колебаний (см. рис. 3). По-видимому, это объясняется тем, что стерическая компонента уровня, которая связана с бароклинной циркуляцией вод, имеет характерный масштаб изменчивости от года до нескольких лет, в то время

как баристатическая компонента демонстрирует внутрисезонный баротропный отклик на ветровое воздействие. В периоды рассогласования фазы колебаний уровня моря и индекса АО баристатическая компонента уровня возрастала, чтобы компенсировать понижение стерической компоненты согласно формуле (1). В наиболее ярко выраженных ситуациях рассогласования фазы в январе 2007 г. и августе 2011 г. (см. рис. 2, 3) баристатическая компонента уровня моря равнялась соответственно 2.33 и 1.3 см в соответствии с формулой (1). Их сопоставление со спутниковыми данными гравиметрии *GRACE* дало независимую оценку баристатического уровня в указанные периоды (2.1 ± 0.7) см в данном секторе СНБ [20].

Поскольку вклад сезонной и межгодовой изменчивости стерической компоненты уровня преобладает в изменчивости уровня моря в секторе СНБ, выделение более долгосрочного режима бароклинической циркуляции, обусловленной межгодовой изменчивостью индекса АО, является сложной задачей и требует данных за гораздо более длительный период (~30–50 лет). Для этих целей перспективно использовать подход с применением реконструкции полей уровня моря на основе синтеза данных альтиметрии и многолетних рядов наблюдений на береговых мареографах [21], что является одной из наших ближайших задач.

Разница между областями положительных и отрицательных значений уровня моря в секторе СНБ создает градиент давления, который вызывает поверхностные геострофические течения вдоль кромки шельфа в восточном направлении для циклонического режима ($AO > 0$) (см. рис. 4, *a*) и в западном для антициклонического режима (см. рис. 4, *b*). Значения скоростей поверхностных геострофических течений, осредненных за 2003–2014 гг., равны ~10 см/с вдоль кромки шельфа и в целом согласуются с известной картой течений в секторе СНБ (см. рис. 1).

Выводы

Основные результаты в статье демонстрируют особенности отклика уровня моря и поверхностных геострофических течений сектора СНБ на циклоническую/антициклоническую циркуляцию атмосферы, описываемую с помощью индекса АО.

Длительность отрицательной и положительной фаз индекса АО за период 2003–2009 гг. одинакова и составила ~3 года, при этом амплитуда изменялась от –0.5 до 0.7. В 2009–2014 гг. длительность обеих фаз уменьшилась и стала равна приблизительно 1 году, при этом амплитуда увеличилась от –1.5 во время отрицательной фазы индекса АО до 0.85 во время положительной фазы.

Анализ долговременной изменчивости стерического уровня показал взаимосвязь бароклинической циркуляции с межгодовой изменчивостью индекса АО. В рассматриваемом секторе океана халостерическая компонента вносит бóльший вклад в стерические колебания уровня, чем термостерическая. По синхронным минимальным понижениям халостерической компоненты уровня и максимальным повышением термостерической компоненты уровня можно выделить периоды времени, когда поступление атлантических вод в сектор СНБ возрастало.

Предложены регрессионные соотношения для уровня моря, компонент геострофических скоростей и индекса АО. Рассчитанные коэффициенты линейной регрессии α_{DT}^i для аномалий уровня моря составляют ~ 2 см в шельфовой зоне и около -1 см в глубоководной части сектора. Таким образом, перепад уровня между шельфом и более глубоководной частью составляет ~ 3 см на 1 единицу индекса АО.

Средние значения геострофических скоростей по данным альтиметрии за 2003–2014 гг. соответствуют известной картине течений в секторе СНБ. Коэффициенты линейной регрессии модуля аномалий скорости течений α_{modV}^i (3) имеют значения ~ 0.5 см/с на 1 единицу индекса АО. Таким образом, во время положительной фазы индекса АО, когда центральная часть Арктики занята циклоном, наблюдается увеличение аномалий скоростей течений, что способствует притоку теплых атлантических вод в сектор СНБ, в том числе и в Баренцево море. Во время отрицательной фазы АО, когда над Арктикой находится антициклоническая область давления, знаки аномалии скоростей течений меняются на противоположные, что уменьшает приток теплых атлантических вод в Баренцево море.

Полученные регрессионные соотношения можно использовать для оценки уровня моря и геострофических скоростей в рассмотренном секторе СНБ при ретроспективном или прогностическом анализе индекса АО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В. В., Фролов И. Е., Фильчук К. В. Трансформация атлантической воды в северо-восточной части Баренцева моря в зимний сезон // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66, № 3. С. 246–266. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-246-266>
2. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system / L. H. Smedsrud [et al.] // Reviews of Geophysics. 2013. Vol. 51, iss. 3. P. 415–449. doi:10.1002/rog.20017
3. Armitage T. W. K., Bacon S., Kwok R. Arctic sea level and surface circulation response to the arctic oscillation // Geophysical Research Letters. 2018. Vol. 45, iss. 13. P. 6576–6584. <https://doi.org/10.1029/2018GL078386>
4. Proshutinsky A. Y., Johnson M. A. Two circulation regimes of the wind-driven Arctic Ocean // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1997. Vol. 102, iss. C6. P. 12493–12514. doi:10.1029/97JC00738
5. Arctic circulation regimes / A. Proshutinsky [et al.] // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2015. Vol. 373, iss. 2052. 20140160. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0160>
6. Timmermans M.-L., Marshall J. Understanding Arctic Ocean circulation: A review of ocean dynamics in a changing climate // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2020. Vol. 125, iss. 4. e2018JC014378. <https://doi.org/10.1029/2018JC014378>
7. Belokopytov V. N. Factors reducing efficiency of the operational oceanographic forecast systems in the Arctic basin // Physical Oceanography. 2017. Iss. 2. P. 19–24. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2017-2-19-24>
8. Arctic ocean sea level record from the complete radar altimetry era: 1991–2018 / S. K. Rose [et al.] // Remote Sensing. 2019. Vol. 11, iss. 14. 1672. <https://doi.org/10.3390/rs11141672>
9. Arctic sea surface height variability and change from satellite radar altimetry and GRACE, 2003–2014 / T. W. K. Armitage [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2016. Vol. 121, iss. 6. P. 4303–4322. doi: 10.1002/2015JC011579

10. Arctic Ocean surface geostrophic circulation 2003–2014 / T. W. K. Armitage [et al.] // *The Cryosphere*. 2017. Vol. 11, iss. 4. P. 1767–1780. <https://doi.org/10.5194/tc-11-1767-2017>
11. Лемешко Е. Е. Самоорганизующиеся карты атмосферной циркуляции и межгодовая изменчивость гидрометеорологических полей в Арктике // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 3. С. 48–62. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-48-62
12. UDASH – Unified Database for Arctic and Subarctic Hydrography / A. Behrendt [et al.] // *Earth System Science Data*. 2018. Vol. 10, iss. 2. P. 1119–1138. <https://doi.org/10.5194/essd-10-1119-2018>
13. Белоненко Т. В., Колдунов А. В. О трендах стерических колебаний уровня в Северной Атлантике // *Исследование Земли из космоса*. 2018. № 5. С. 31–40. doi:10.31857/S020596140003236-0
14. Лемешко Е. Е., Лемешко Е. М. Тренды уровня Северного Ледовитого океана // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 2. С. 28–40. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-28-40
15. Steele M., Ermold W. Steric sea level change in the northern seas // *Journal of Climate*. 2007. Vol. 20, iss. 3. P. 403–417. <https://doi.org/10.1175/JCLI4022.1>
16. Volkov D. L., Landerer F. W. Nonseasonal fluctuations of the Arctic Ocean mass observed by the GRACE satellites // *Journal of Geophysical Researches: Oceans*. 2013. Vol. 118, iss. 12. P. 6451–6460. doi:10.1002/2013JC009341
17. Volkov D. L., Landerer F. W., Kirillov S. A. The genesis of sea level variability in the Barents Sea // *Continental Shelf Research*. 2013. Vol. 66. P. 92–104. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.07.007>
18. Arctic Ocean Circulation Patterns Revealed by GRACE / C. Peralta-Ferriz [et al.] // *Journal of Climate*. 2014. Vol. 27, iss. 4. P. 1445–1468. <https://doi.org/10.1175/JCLID-13-00013.1>
19. Себер Д. А. Ф. Линейный регрессионный анализ. М. : Мир, 1980. 456 с.
20. Лемешко Е. М. Долговременная изменчивость уровня Баренцева моря по спутниковым данным // *Моря России: исследования береговой и шельфовой зон (XXVIII береговая конференция): Тезисы докладов всероссийской научной конференции, г. Севастополь, 21–25 сентября 2020 г. Севастополь : ФГБУН ФИЦ МГИ, 2020. С. 119–120. URL: http://mhi-ras.ru/assets/files/morya_rossii-2020_tezisy.pdf (дата обращения: 30.05.2021).*
21. Ray R. D., Douglas B. C. Experiments in reconstructing twentieth-century sea levels // *Progress in Oceanography*. 2011. Vol. 91, iss. 4. P. 496–515. doi:10.1016/j.poccean.2011.07.021

Об авторах:

Лемешко Егор Евгеньевич, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 7313-4819, ResearcherID: C-5691-2016, Scopus Author ID: 57205681264**, e.lemeshko@mhi-ras.ru

Лемешко Евгений Михайлович, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 3836-5786, ResearcherID: S-7815-2018, Scopus Author ID: 6508300982**, evgeny.lemeshko@mhi-ras.ru

Новицкая Виктория Павловна, инженер-исследователь, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 9079-6274**, victory.novitskaya@mhi-ras.ru

Заявленный вклад авторов:

Лемешко Егор Евгеньевич – обзор литературы по проблеме исследования, выборка данных альтиметрии по Арктике, разработка программного обеспечения и проведение расчетов, построение графиков, карт, качественный анализ результатов и их интерпретация, количественная обработка и описание результатов исследования, обсуждение результатов работы, формулирование выводов, написание статьи

Лемешко Евгений Михайлович – общее научное руководство исследованием, формулировка целей и задач исследования, выбор методов анализа данных, формулировка и анализ полученных результатов, их интерпретация, обсуждение результатов работы, формулирование выводов, редактирование статьи

Новицкая Виктория Павловна – обзор литературы по изменчивости стерической компоненты уровня моря, обработка гидрологических данных для района исследований, качественный анализ результатов и их интерпретация, построение графиков и описание результатов исследования, обсуждение результатов работы и выводов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Ivanov, V.V., Frolov, I.E. and Filchuk, K.V., 2020. Transformation of Atlantic Water in the North-Eastern Barents Sea in Winter. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*, 66(3), pp. 246–266. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-246-266>
2. Smedsrud, L.H., Esau, I., Ingvaldsen, R.B., Eldevik, T., Haugan, P.M., Li, C., Lien, V.S., Olsen, A., Omar, A.M., [et al.], 2013. The Role of the Barents Sea in the Arctic Climate System. *Reviews of Geophysics*, 51(3), pp. 415–449. doi:10.1002/rog.20017
3. Armitage, T.W.K., Bacon, S. and Kwok, R., 2018. Arctic Sea Level and Surface Circulation Response to the Arctic Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 45(13), pp. 6576–6584. <https://doi.org/10.1029/2018GL078386>
4. Proshutinsky, A.Y. and Johnson, M.A., 1997. Two Circulation Regimes of the Wind-Driven Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102(C6), pp. 12493–12514. doi:10.1029/97JC00738
5. Proshutinsky, A., Dukhovskoy, D., Timmermans, M.-L., Krishfield, R. and Bamber, J.L., 2015. Arctic Circulation Regimes. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373(2052), 20140160. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0160>
6. Timmermans, M.-L. and Marshall, J., 2020. Understanding Arctic Ocean Circulation: A Review of Ocean Dynamics in a Changing Climate. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(4), e2018JC014378. <https://doi.org/10.1029/2018JC014378>
7. Belokopytov, V.N., 2017. Factors Reducing Efficiency of the Operational Oceanographic Forecast Systems in the Arctic Basin. *Physical Oceanography*, (2), pp. 19–24. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2017-2-19-24>
8. Rose, S.K., Andersen, O.B., Passaro, M., Ludwigsen, C.A. and Schwatke, C., 2019. Arctic Ocean Sea Level Record from the Complete Radar Altimetry Era: 1991–2018. *Remote Sensing*, 11(14), 1672. <https://doi.org/10.3390/rs11141672>

9. Armitage, T.W.K., Bacon, S., Ridout, A.L., Thomas, S.F., Aksenov, Y. and Wingham, D.J., 2016. Arctic Sea Surface Height Variability and Change from Satellite Radar Altimetry and GRACE, 2003-2014. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(6), pp. 4303–4322. doi:10.1002/2015JC011579
10. Armitage, T.W.K., Bacon, S., Ridout, A.L., Petty, A.A., Wolbach, S. and Tsamados, M., 2017. Arctic Ocean Surface Geostrophic Circulation 2003–2014. *The Cryosphere*, 11(4), pp. 1767–1780. <https://doi.org/10.5194/tc-11-1767-2017>
11. Lemeshko, E.E., 2020. Self-Organizing Maps of Atmospheric Circulation and Interannual Variability of Hydrometeorological Fields in the Arctic. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 48–62. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-48-62 (in Russian).
12. Behrendt, A., Sumata, H., Rabe, B. and Schauer, U., 2018. UDASH – Unified Database for Arctic and Subarctic Hydrography. *Earth System Science Data*, 10(2), pp. 1119–1138. <https://doi.org/10.5194/essd-10-1119-2018>
13. Belonenko, T.V. and Koldunov, A.V., 2019. Trends of Steric Sea Level Oscillations in the North Atlantic. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 55(9), pp. 1106–1113. doi:10.1134/S0001433819090081
14. Lemeshko, E.E. and Lemeshko, E.M., 2020. Arctic Ocean Level Trends. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 28–40. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-28-40 (in Russian).
15. Steele, M. and Ermold, W., 2007. Steric Sea Level Change in the Northern Seas. *Journal of Climate*, 20(3), pp. 403–417. <https://doi.org/10.1175/JCLI4022.1>
16. Volkov, D.L. and Landerer, F.W., 2013. Nonseasonal Fluctuations of the Arctic Ocean Mass Observed by the GRACE Satellites. *Journal of Geophysical Researches: Oceans*, 118(12), pp. 6451–6460. doi:10.1002/2013JC009341
17. Volkov, D.L., Landerer, F.W. and Kirillov, S.A., 2013. The Genesis of Sea Level Variability in the Barents Sea. *Continental Shelf Research*, 66, pp. 92–104. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.07.007>
18. Peralta-Ferriz, C., Morison, J.H., Wallace, J.M., Bonin, J.A. and Zhang, J., 2014. Arctic Ocean Circulation Patterns Revealed by GRACE. *Journal of Climate*, 27(4), pp. 1445–1468. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00013.1>
19. Seber, J.A.F. *Linear Regression Analysis*. New York : Wiley & sons, 1977. 465 с.
20. Lemeshko, E.M., 2020. Long-Term Variability of the Barents Sea Level According to Satellite Data. In: MHI, 2020. [*Seas of Russia: Studies of the Coastal and Shelf Zones (XXVIII coastal conference): Abstracts of the all-Russian Scientific Conference, Sevastopol, September 21-25, 2020*]. Sevastopol: MHI, pp. 119–120. Available at: http://mhi-ras.ru/assets/files/morya_rossii-2020_tezisy.pdf [Accessed: 30 May 2021] (in Russian).
21. Ray, R.D. and Douglas, B.C., 2011. Experiments in Reconstructing Twentieth-Century Sea Levels. *Progress in Oceanography*, 91(4), pp. 496–515. doi:10.1016/j.pocean.2011.07.021

About the authors:

Egor E. Lemeshko, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **SPIN-code: 7313-4819**; **ResearcherID: C-5691-2016**; **Scopus Author ID: 57205681264**, e.lemeshko@mhi-ras.ru

Evgeny M. Lemeshko, Senior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), **SPIN-code: 3836-5786**, **ResearcherID: S-7815-2018**, **Scopus Author ID: 6508300982**, *evgeny.lemeshko@mhi-ras.ru*

Victoria P. Novitskaya, Research Engineer, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **SPIN-code: 9079-6274**, *victory.novitskaya@mhi-ras.ru*

Contribution of the authors:

Egor E. Lemeshko – review of literature on the research problem, sampling of altimetry data for the Arctic, software development and calculations, plotting, charting, qualitative analysis of the results and their interpretation, quantitative processing and description of research results, discussion of work results, writing the article, formulation of conclusions

Evgeny M. Lemeshko – general scientific supervision of research, summary of subject research, formulation of research goals and objectives, choice of data analysis methods, formulation and analysis of the obtained results and their interpretation, discussion of work results, formulation of conclusions

Victoria P. Novitskaya – review of literature on the variability of the steric component of sea level, hydrological data processing for the study area, qualitative analysis of the results and their interpretation, plotting and description of the study results, discussion of work results and conclusions

All the authors have read and approved the final manuscript.