

## Уровень океана как показатель межгодовой изменчивости циркуляции вод и климата в Северной Атлантике

В. Н. Малинин, Я. И. Ангудович

Российский государственный гидрометеорологический университет  
Санкт-Петербург, 192007, Россия  
E-mail: yaromir.angudovich@mail.ru

Выполнен анализ взаимосвязи межгодовой изменчивости характеристик уровня океана, циркуляции вод и различных климатических индексов в Северной Атлантике. По альтиметрическим данным с 1993 г. на широтных разрезах  $26^\circ$  ( $80\text{--}15^\circ$  з. д.) и  $56^\circ$  ( $57\text{--}10^\circ$  з. д.) рассчитывались градиенты уровня ( $\Delta h$ ) на концах локальных разрезов, характеризующие геострофические составляющие течения, а также среднее значение уровня на этих разрезах ( $h_{\text{cp}}$ ) за период 1993–2022 гг. Разрез на широте  $26^\circ$  является реперным для САКВ (субтропический антициклонический круговорот вод), а на широте  $56^\circ$  — для СЦКВ (субполярный циклонический круговорот вод). Показано, что  $\Delta h$  и  $h_{\text{cp}}$  на локальных разрезах ( $57\text{--}38$ ,  $38\text{--}28$  и  $28\text{--}10^\circ$  з. д.) широты  $56^\circ$  имеют значимую корреляцию с климатическими индексами, особенно высокую на восточном разрезе  $28\text{--}10^\circ$ . Высокая статистическая связь отмечается между изменениями уровня на разрезе  $56^\circ$  с. ш. и температуры поверхности океана в северных морях, в соответствии с которой при повышении уровня происходит ослабление глубокой конвекции в морях Лабрадор и Ирмингера, а также в Гренландской котловине. Осуществлена статистическая параметризация АМОС (Атлантическая меридиональная опрокидывающаяся циркуляция) и  $Q_{\text{УМО}}$  (обратный поток вод за счёт рециркуляции субтропического круговорота) для широтного разреза на  $56^\circ$  с. ш. по данным об уровне. Показано, что точность оценивания АМОС и  $Q_{\text{УМО}}$  состоит в пределах 89–96 % вклада в дисперсию рядов. В качестве характеристики циркуляции в системе циклонического и антициклонического круговоротов вод (СЦКВ и САКВ) может быть использован интегральный индекс Североатлантической циркуляции (ИСЦ, *англ.* North Atlantic Circulation index), который представляет собой разность морского уровня на широтных разрезах  $26^\circ$  ( $80\text{--}15^\circ$  з. д.) и  $56^\circ$  ( $57\text{--}10^\circ$  з. д.). С учётом его высокой статистической связи с Североатлантическим колебанием и другими индексами он может служить важным показателем межгодовой изменчивости циркуляции вод и климата в Северной Атлантике.

**Ключевые слова:** Северная Атлантика, морской уровень, циркуляция вод, глубокая конвекция, климатические индексы

Одобрена к печати: 10.09.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-335-353

### Введение

Изменения уровня и циркуляции океана тесно связаны друг с другом. Морские течения приводят к повышению уровня в одних районах и его опусканию в других. В свою очередь изменения уровня вызывают течения и стимулируют их интенсивность, поскольку без наклона уровня поверхности течения отсутствуют. При повышении градиента уровня интенсивность течений, как правило, возрастает (Смирнов и др., 2010; Chafik et al., 2019; Ezer, 2015; Ivchenko et al., 2011). В Северной Атлантике (СА) существуют два мощных круговорота вод, воздействующих на изменение климата не только в самой СА, но и далеко за её пределами. Самым сильным является субтропический антициклонический круговорот вод (САКВ, *англ.* subtropical gyre — STG), включающий Северное пассатное течение, западные пограничные течения Флоридское и Гольфстрим, широтное Азорское и восточное пограничное Канарское (*рис. 1*, см. с. 336), причём основные закономерности САКВ достаточно хорошо известны (Малинин, 2012; Chafik et al., 2019; Lavender et al., 2010; Repschläger et al., 2017; Stramma, Siedler, 1988).

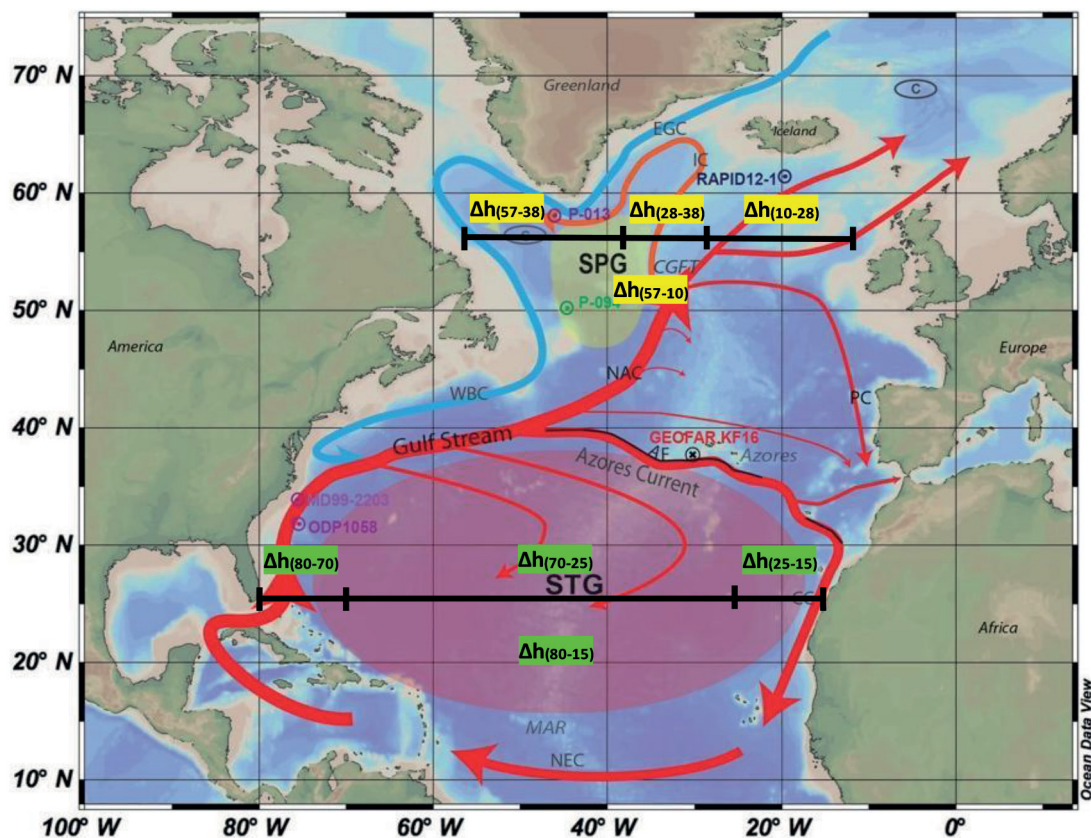


Рис. 1. Схема циркуляции вод в Северной Атлантике (Repschläger et al., 2017). Красные стрелки — тёплые поверхностные течения; синие стрелки — холодные глубинные течения. Символом «с» в овале обозначен регион формирования интенсивной конвекции. Чёрные линии — уровенные разрезы на широтах 26° и 56° с. ш.

Основным механизмом, приводящим в движение субтропическую циркуляцию, являются тропические пассаты и западный атмосферный перенос в умеренных широтах. Интенсивность циркуляции САКВ в значительной степени контролируется атлантической меридиональной опрокидывающейся циркуляцией (АМОС) на широтном разрезе через весь океан на 26° с. ш. (Малинин, Ангудович, 2022). Начиная с 2004 г., на данном разрезе проводится мониторинг переноса объёма вод в системе в рамках программы RAPID (*англ.* The Rapid Climate Change Programme) с использованием температуры, солёности и скорости течений, полученных с буёв «Арго» (*англ.* Argo). Описание методологии расчётов даётся в работе (McCarthy et al., 2015). При этом считается, что именно АМОС имеет определяющее влияние на изменения климата СА, потепление западной Европы и «атлантификацию» Арктики (Аксенов, Иванов, 2018; Алексеев, 2015; Иванов и др., 2014; Asbjørnsen et al., 2020; Polyakov et al., 2017 и др.). Изучению АМОС посвящено огромное число публикаций, поэтому здесь отметим только обзорные работы (Малинин, Ангудович, 2022; Степанов, 2017; Buckley, Marshall, 2016; Frajka-Williams et al., 2019, 2021; Srokosz et al., 2012).

Субполярный циклонический круговорот вод (СЦКВ, *англ.* subpolar gyre, SPG) включает течения Северо-Атлантическое, Ирмингера, Восточно-Гренландское, Западно-Гренландское, Лабрадорское и простирается примерно от 45 до 65° с. ш. (Rhein et al., 2011) (см. рис. 1). Циркуляция СЦКВ имеет большое значение в регулировании процессов взаимодействия тёплых вод СА с полярным регионом (Higginson et al., 2011; Marzocchi et al., 2014 и др.). Приток тёплых вод на север обеспечивают течения Ирмингера и Северо-Атлантическое. В результате осенне-зимней конвекции в морях Лабрадор (МЛ) и Ирмингера (МИ), распространяющейся до глубин 1000–2000 м, и поступлением очень плотных глубинных вод через Датский пролив из Гренландского моря формируется североатлантическая глубин-

ная водная масса (Крашенинникова, 2019; Федоров и др., 2018; Bailey et al., 2005; Centurioni et al., 2004; Dickson, Brown, 1994; Rhein et al., 2015 и др.). Основным очагом глубокой конвекции в Гренландском море является Гренландская котловина (ГК), где её формирование регулируется множеством факторов (Bashmachnikov et al., 2021; Marshall, Schott, 1991 и др.). Североатлантическая глубинная водная масса даёт начало глобальному океанскому конвейеру Брокера (Лаппо, 1984; Broecker, 1991 и др.), который переносит её на юг, в основном в системе Западного глубинного пограничного течения, до района  $40^\circ$  ю.ш. (Крашенинникова, 2019; Rhein et al., 2015). Кроме того, северные моря СЦКВ являются самым мощным очагом поглощения углекислого газа из атмосферы (Малинин, Вайновский, 2022).

Естественно, САКВ и СЦКВ должны быть связаны друг с другом. Такая связь обсуждается в работе (Дворянинов и др., 2016). По мнению авторов, она обусловлена Североатлантическим колебанием (САК). При положительной фазе САК и с ростом зональной циркуляции в атмосфере интенсивность круговоротов усиливается, восточная часть Северо-Атлантического течения на границе раздела между САКВ и СЦКВ смещается в восточном направлении, что приводит к уменьшению притока вод в полярные широты. С переходом САК в отрицательную фазу, наоборот, интенсивность круговоротов ослабевает и поток тёплых вод в Исландский бассейн возрастает.

Изучению взаимосвязи уровня и циркуляции в СА посвящено множество работ (Федоров и др., 2017; Chafik et al., 2019; Dong et al., 2019; Ezer, 2015; Корр, 2013 и др.). В частности, в статье (Федоров и др., 2017) рассматривается крупномасштабная геострофическая циркуляция в СА по данным спутниковой альтиметрии за период 1993–2015 гг. Показано, что для большей части рассматриваемой акватории происходит ослабление течений, которое особенно значительно в области Гольфстрима, причём струя Гольфстрима смещается в южном направлении. Кроме того, выявлено изменение формы Субтропического круговорота в зональном направлении, смещение на север Северного пассатного течения, Межпассатного противотечения и других течений. В работе (Малинин, Ангудович, 2022) выполнен расчёт межгодовых изменений уровня моря на широтном разрезе  $26^\circ$  для его отдельных участков и через всю СА в пределах  $80-15^\circ$  з.д. и показана высокая положительная корреляция между градиентами уровня  $\Delta h$  на крайних точках разрезов и его средними значениями  $h_{cp}$  с Североатлантическим колебанием. Статистическая параметризация среднегодовых значений переноса воды на широте  $26^\circ$  с.ш. на север (АМОС) и юг ( $Q_{UMO}$  (англ. Upper Mid Ocean), перенос водных масс с севера на юг выше главного термоклина за счёт рециркуляции субтропического круговорота) по данным об уровне океана на этой широте позволила получить регрессионные уравнения, которые весьма точно (77–92 %) описывают дисперсию временных рядов АМОС и  $Q_{UMO}$ .

В связи с этим можно предполагать, что для описания закономерностей циклонического круговорота вод также можно выделить широтный разрез, который наилучшим образом по данным градиентов уровня  $\Delta h$  и его средних значений  $h_{cp}$  должен быть связан с циркуляцией водных масс, областями мощной глубокой конвекции и основными климатическими индексами Северной Атлантики. Решению этой задачи, а также обоснованию интегрального уровня индекса, который одновременно может служить показателем межгодовой изменчивости циркуляции вод в пределах САКВ и СЦКВ, посвящена настоящая работа.

## Материалы и методы

Основными данными, полученными с использованием информационной службы E. U. Copernicus (<https://doi.org/10.48670/moi-00148>), послужил архив реанализа аномалий уровня моря SEALEVEL\_GLO\_PHY\_L4\_MY\_008\_047 (1993–2022) (в м), ассимилированный по альтиметрическим наблюдениям. Данные реанализа имеют пространственное разрешение  $0,25 \times 0,25^\circ$  и минимальную среднесуточную дискретность. Они отличаются высочайшим качеством высотомерных измерений и геофизических поправок и создаются с использованием уникальной системы, минимизирующей возникновение ошибок в данных. В реанализе

учитываются результаты спутниковых миссий, таких как Sentinel, Jason, Cryosat, Envisat (англ. Environmental Satellite), ERS (англ. European Remote Sensing Satellite) и др., относительно средней динамической топографии за 20 лет (1993–2012). Благодаря высокой пространственной дискретизации и полноте выборки использование данного архива является наиболее удобным в расчётах.

В настоящей работе были использованы также основные климатические индексы с 1993 по 2022 г. для Северной Атлантики. Среди них такие известные, как индекс САК, индекс GSNW (англ. Gulfstream North Wall, «северная стена» Гольфстрима) и АМО (Атлантическая мультидекадная осциляция). Индексом, который в данной работе косвенно отражает процессы «атлантификации» Арктики, служит индекс Арктической осциляции (АО). Все эти и другие климатические индексы находятся в открытом доступе на сайте физической научной лаборатории PSL NOAA (англ. Physical Sciences Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration) (<https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>).

Дополнительно в работе использовались оценки суммарной теплоотдачи в атмосферу в Бермудской, Норвежской и Лабрадорской энергоактивных зонах океана (ЭАЗО). Наиболее мощной является Бермудская ЭАЗО, которая влияет на короткопериодные колебания климата как в Северной Атлантике, так и за её пределами. Суммарная теплоотдача рассчитана как сумма турбулентного потока тепла (P) и затрат тепла на испарение (LE) по данным известного архива NCEP/DOE (англ. National Centers for Environmental Prediction, Department of Energy — Национальный центр экологических прогнозов США, Департамент энергетики) AMIP-II Reanalysis (англ. Atmospheric Model Intercomparison Project) (Reanalysis-2) с использованием ресурсов Интернационального исследовательского института климата и общества Columbia Climate School (<https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/NOAA/NCEP-DOE/Reanalysis-2/>). Данный метод был подробно описан в работе (Малинин, Шмакова, 2018).

Для оценки расхода АМОС использовались данные программы Rapid, на основе которой с 2004 г. активно выполняются измерения расхода АМОС и его составляющих, т. е. экмановского переноса ( $Q_{EK}$ ), переноса за счёт течения Гольфстрим ( $Q_{GS}$ ) и обратного потока вод за счёт рециркуляции антициклонического круговорота ( $Q_{UMO}$ ). Эти данные можно получить на официальном портале программы [https://rapid.ac.uk/rapidmoc/rapid\\_data/datadl.php](https://rapid.ac.uk/rapidmoc/rapid_data/datadl.php).

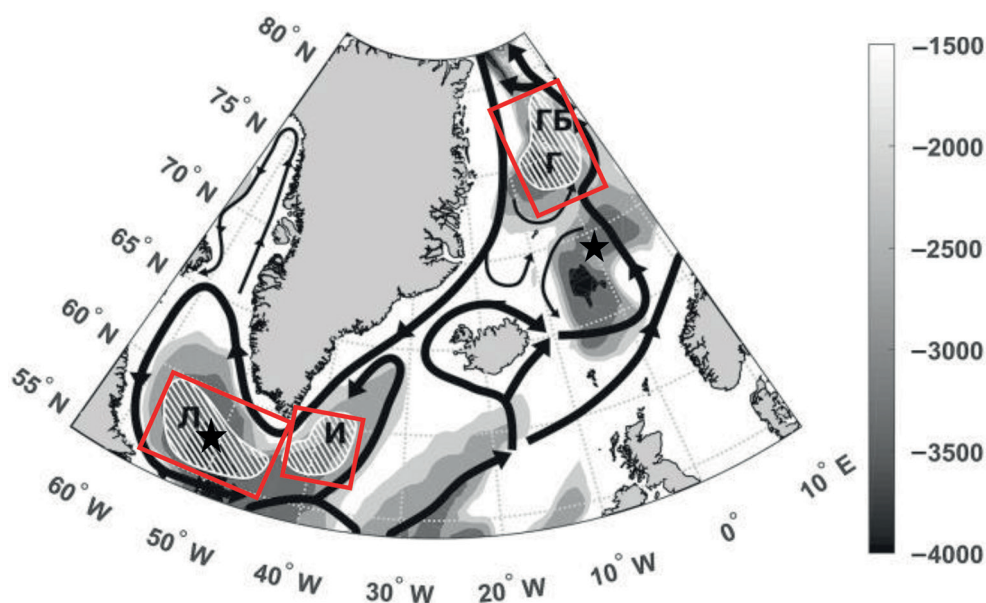


Рис. 2. Схема циркуляции субполярного циклонического круговорота (чёрные стрелки) и локализация районов глубокой конвекции (белые линии). Оттенками серого цвета обозначена батиметрия от 1,5 до 4 км. Красными прямоугольниками отмечены области, для которых рассчитана ТПО. Чёрными звёздочками выделены центры Норвежской и Лабрадорской энергоактивных зон океана (Федоров и др., 2018)

Северная Атлантика характеризуется процессами глубокой конвекции в морях Лабрадор, Ирмингера, а также в районе Гренландской котловины. Перераспределение тепла на поверхности океана в данных областях является косвенной характеристикой мощности конвективных процессов. Из архива реанализа Copernicus: ARCTIC\_MULTIYEAR\_PHY\_002\_003 ([https://data.marine.copernicus.eu/product/ARCTIC\\_MULTIYEAR\\_PHY\\_002\\_003/description](https://data.marine.copernicus.eu/product/ARCTIC_MULTIYEAR_PHY_002_003/description)) были взяты среднемесячные данные с 1993 по 2022 г. по температуре поверхности океана (ТПО) и распределению температуры по глубине в слоях: 0–30 м с дискретностью 5 м, 30–100 м с дискретностью 10 м, 100–200 м с дискретностью 25 м, 200–500 м с дискретностью 50 м и в слое 500–1000 м с дискретностью 100 м. Среднее значение по глубине в слое 0–1000 м рассчитано по среднему взвешенному, т. е. с учётом веса каждого слоя воды по глубине. Пространственная дискретность координатной сетки составляет  $12,5 \times 12,5$  км. Схема циркуляции субполярного циклонического круговорота и локализация районов глубокой конвекции приводятся на *рис. 2* (см. с. 338). Кроме того, в работе использованы оценки трендов стерических колебаний в слое 0–2000 м в морях Лабрадор и Ирмингера по данным NOAA на сайте [https://www.ncei.noaa.gov/access/global-ocean-heat-content/fsl\\_global.html](https://www.ncei.noaa.gov/access/global-ocean-heat-content/fsl_global.html) за 2005–2022 гг. Методика расчёта трендов стерических колебаний, основанная на исторических наблюдениях, дополненных данными батитермографов и буёв Argo, приводится в работе (Levitus et al., 2012).

Красными квадратами на *рис. 2* выделены области, для которых были рассчитаны вертикально-осреднённые до 1000 м значения температуры воды в узлах сетки, которые затем усреднялись для всей области. Чёрными звёздочками выделены центры Норвежской и Лабрадорской энергоактивных зон океана. Штрихованные белые линии охватывают районы глубокой конвекции, расположение которых было выделено в статье (Федоров и др., 2018) по анализу различных литературных источников (Л — конвекция в море Лабрадор (Lavender et al., 2002; Marshall, Schott, 1994; Marshall et al., 1998 и др.), И — в море Ирмингера (Гладышев и др., 2016; Pickart et al., 2003a, b; Våge et al., 2009; de Jong, de Steur, 2016 и др.), Г — в Гренландском море, ГБ — бассейн Борей в Гренландском море (Androsov et al., 2005; Johannessen et al., 2013; Moore et al., 2015; Wadhams et al., 2002 и др.).

*Таблица 1.* Оценки коэффициентов корреляции между ТПО и средневзвешенной температурой в слое от 0 до 1000 м для очагов глубокой конвекции за 1993–2022 гг. для зимы, лета и в среднем за год

Период	МЛ	МИ	ГК
Год	0,84	0,93	0,94
Зима	0,80	0,89	0,91
Лето	0,51	0,58	0,73

Сопоставление коэффициентов корреляции значений ТПО в областях глубокой конвекции со средневзвешенной температурой в слое 0–1000 м (красные прямоугольники на *рис. 2*) за период с 1993 по 2022 г. представлено в *табл. 1*. Нетрудно видеть, что для зимы и в среднем за год отмечается очень высокая корреляция. Это означает, что ТПО может служить индикатором опускания поверхностных вод вглубь океана за счёт конвекции. Летом относительно высокая корреляция свойственна только Гренландской котловине.

## Результаты и их обсуждение

Исходя из особенностей циркуляции вод в Северной Атлантике были проанализированы данные по изменениям уровня на двух широтных разрезах (см. *рис. 1*). Южный разрез на  $26^\circ$  с.ш. между  $80$  и  $15^\circ$  з.д. характеризует систему субтропического антициклонического круговорота вод и АМОС, поскольку на данной широте в соответствии с программой Rapid осуществляются непосредственные измерения расхода АМОС с 2004 г. Данный разрез можно

считать реперным в системе антициклонической циркуляции САКВ (Малинин, Ангудович, 2022). По аналогии с этим разрезом нами был выделен широтный разрез на  $56^\circ$  с. ш. между  $57$  и  $10^\circ$  з. д., изменения уровня на котором должны косвенно характеризовать интенсивность меридиональной циркуляции. При этом основные течения, проходящие через данную широту, образуют систему СЦКВ. С учётом особенностей циркуляции разрез на  $56^\circ$  с. ш. был разделён на отдельные участки (локальные разрезы). Западная часть от  $57^\circ$  до  $38^\circ$  з. д. ( $h_{(57-38)}$ ) характеризует в основном расход Лабрадорского течения. Здесь уровень понижается по направлению с запада на восток. Центральную часть разреза от  $38$  до  $28^\circ$  з. д. ( $h_{(28-38)}$ ) пересекает течение Ирмингера. Через восточную часть разреза от  $28$  до  $10^\circ$  з. д. ( $h_{(10-28)}$ ) проходит Северо-Атлантическое течение, которое через Фареро-Шотландский и Фареро-Исландский проливы входит в Норвежское море и далее проникает в Баренцево море, тем самым способствуя потеплению западной Европы и западного сектора Арктики (Årthun et al., 2012). На этих разрезах уровень океана повышается с запада на восток.

В работе (Малинин, Ангудович, 2022) было показано, что уровень на разрезе  $26^\circ$  с. ш. имеет тесную корреляцию с наиболее важными климатическими индексами СА. В связи с этим выполнен расчёт корреляционных связей отдельных частей уровня разреза на  $56^\circ$  с. ш. с климатическими индексами (АМО — Атлантическая мультидекадная осцилляция), а также с ТПО в морях Лабрадор, Ирмингера, Гренландской котловине и в центрах Норвежской, Бермудской, Лабрадорской и Ньюфаундлендской энергоактивных зон ( $\text{ЭАЗО}_{\text{Нор}}$ ,  $\text{ЭАЗО}_{\text{Бер}}$ ,  $\text{ЭАЗО}_{\text{Лабр}}$ ,  $\text{ЭАЗО}_{\text{Ньюфаунд}}$ ), которые значительно влияют на климат не только в СА, но и делают его более влажным в Скандинавии, северо-западной части России и западном секторе Арктики (Малинин, Шмакова, 2018). При этом использовались градиенты уровня на концах разрезов ( $\Delta h$ ), характеризующие геострофические составляющие течения, а также среднее значение уровня на разрезе ( $h_{\text{cp}}$ ). Понятно, что при усилении интенсивности течения на разрезе уровень будет повышаться. Результаты расчётов приводятся в *табл. 2*.

*Таблица 2.* Оценки коэффициентов корреляции  $\Delta h$  и  $h_{\text{cp}}$  на разрезе  $56^\circ$  с. ш. с основными климатическими индексами. Значимые коэффициенты корреляции  $r_{\text{кр}} > 0,37$ , при уровне значимости  $0,05$  по критерию Стьюдента выделены полужирным шрифтом

Параметр	$h_{(57-38)}$		$h_{(28-38)}$		$h_{(10-28)}$	
	$\Delta h$	$h_{\text{cp}}$	$\Delta h$	$h_{\text{cp}}$	$\Delta h$	$h_{\text{cp}}$
ТПО <sub>МЛ</sub>	-0,17	<b>0,83</b>	-0,19	<b>0,76</b>	-0,19	<b>0,62</b>
ТПО <sub>МИ</sub>	-0,36	<b>0,75</b>	-0,37	<b>0,78</b>	-0,36	<b>0,40</b>
ТПО <sub>ГК</sub>	<b>0,67</b>	<b>0,58</b>	<b>0,42</b>	-0,06	<b>0,69</b>	<b>0,70</b>
НорЭАЗО	0,11	<b>0,60</b>	-0,16	0,11	-0,11	-0,09
ЭАЗО <sub>Бер</sub>	<b>0,46</b>	0,03	<b>0,44</b>	-0,29	<b>0,60</b>	<b>0,45</b>
ЭАЗО <sub>Лабр</sub>	0,15	-0,15	-0,06	<b>-0,50</b>	-0,09	<b>-0,71</b>
ЭАЗО <sub>Ньюфаунд</sub>	-0,15	<b>-0,58</b>	-0,14	<b>-0,39</b>	<b>0,45</b>	-0,22
САК	<b>0,44</b>	-0,25	0,22	<b>-0,53</b>	<b>0,82</b>	0,07
АМО	0,27	<b>0,70</b>	0,10	<b>0,39</b>	<b>0,44</b>	<b>0,84</b>
АО	<b>0,51</b>	-0,02	<b>0,40</b>	-0,32	<b>0,71</b>	<b>0,39</b>
GSNW	0,25	<b>-0,46</b>	0,06	<b>-0,64</b>	<b>0,56</b>	<b>-0,38</b>

Из *табл. 2* видно, что  $\Delta h$  и  $h_{\text{cp}}$  на локальных разрезах имеют значимую корреляцию с климатическими индексами. При этом корреляция с оценками  $h_{\text{cp}}$ , как правило, выше, чем с оценками  $\Delta h$ . Дело в том, что  $\Delta h$  обычно представляет относительно малую разность значений  $h$ , вследствие чего погрешности  $\Delta h$  существенно выше по сравнению с оценками  $h_{\text{cp}}$ .

Наиболее высокая корреляция свойственна восточному разрезу, характеризующему самое мощное течение — Северо-Атлантическое. Усиление САК, АО, АМО, Бермудской и Ньюфаундлендской ЭАЗО соответствуют повышению интенсивности геострофической циркуляции вод на этом разрезе. На центральном разрезе интенсивность геострофической циркуляции повышается при ослаблении САК, индекса Гольфстрима и Лабрадорской ЭАЗО. Для западного разреза свойственна довольно высокая положительная корреляция уровня с АМО.

Более высокая статистическая связь отмечается между изменениями уровня на разрезе и ТПО в северных морях. Во всех случаях корреляция оказывается положительной. Особенно высокой она является между уровнями на западном и центральном разрезах с ТПО в морях Лабрадор и Ирмингера, а на восточном разрезе — с ТПО<sub>ГК</sub>. В этих районах, как указывалось выше, происходит формирование североатлантической глубинной водной массы, дающей начало глобальному океанскому конвейеру Брокера, который переносит её на юг в Южное полушарие. Усиление интенсивности течения Ирмингера служит одним из факторов повышения ТПО в море Ирмингера. Западный разрез непосредственно проходит по очагу глубокой конвекции в море Лабрадор. Здесь перенос вод идёт с севера на юг. Очевидно, уровень на этом разрезе должен быть непосредственно связан с изменчивостью характеристик водной массы в данном районе. Прежде всего, это относится к теплосодержанию океана, которое является доминирующим фактором в стерических колебаниях уровня.

Подробное изучение стерических колебаний уровня в морях Лабрадор и Ирмингера выполнено в работе (Белоненко, Федоров, 2018). В ней получены оценки стерических колебаний с использованием комбинированных спутниковых альтиметрических и гравиметрических измерений за 2003–2015 гг. Показано, что стерические колебания в море Лабрадор изменяются в диапазоне от –11 до 10 см, в море Ирмингера от –11 до 12 см. Рассчитаны тренды стерических колебаний уровня, которые свидетельствуют о значительном росте стерической составляющей в изменчивости уровня. Так, в море Лабрадор тренд составляет 5,7–6,0 мм в год. Для моря Ирмингера он изменялся в более широких пределах (3,7–8,1 мм/год). Однако в последующей работе (Белоненко, Колдунов, 2018) выявлено, что использование комбинации данных альтиметрии и GRACE (англ. Gravity Recovery And Climate Experiment) дают завышенные значения стерических колебаний и их трендов. Поэтому построены новые карты трендов стерических колебаний (ТСК) уровня СА по данным реанализов SODA (англ. Simple Ocean Data Assimilation), EN4 и ARMOR (фр. Analyse de Routine Multivariée des Observations MERCATOR), которые носят более реалистичный характер. Для разрезов на широте 56° приближенные оценки ТСК за период 2003–2015 гг. по направлению с запада на восток равны 2,25; –0,75 и 1,5 мм/год. Из табл. 3 видно, что расхождения оценок ТСК по данным NOAA с данными (Белоненко, Федоров, 2018) значительны. Впрочем, это неудивительно, учитывая очень короткие временные ряды и различия в методиках расчёта.

Таблица 3. Оценки тренда аномалий фактического и стерического уровня океана на отдельных разрезах по широте 56° за различные интервалы времени

Разрез на 56° с. ш.	Тренд аномалий фактического уровня за 1993–2022 гг., мм/год	Тренд аномалий фактического уровня за 2005–2022 гг., мм/год	Тренд стерических колебаний уровня за 2005–2022 гг., мм/год
57–38° з. д.	2,25	–0,84	–2,40
38–28° з. д.	0,75	–0,73	–2,57
28–10° з. д.	1,91	1,01	0,14

Для сравнения трендов стерических колебаний с оценками трендов фактических значений уровня обратимся к рис. 3 (см. с. 342), на котором даётся межгодовой ход  $h_{cp}$  на рассматриваемых разрезах за период 1993–2022 гг. Нетрудно видеть, что чётко выделяются три фазы изменений уровня. Первая — интенсивное повышение до 2006 г., вторая — не менее интенсивное понижение до 2016 г., третья — новый быстрый рост уровня. Наиболее выраженный рост уровня отмечается на западном разрезе, самый слабый — на центральном разрезе (табл. 3).

Значительные расхождения в трендах фактического и стерического уровня за период 2005–2022 гг. связаны не только с короткой продолжительностью рассматриваемого периода, но, вероятно, с тем, что не учитывается массообмен вертикального столба воды с атмосферой, т. е. с испарением и выпадением осадков.

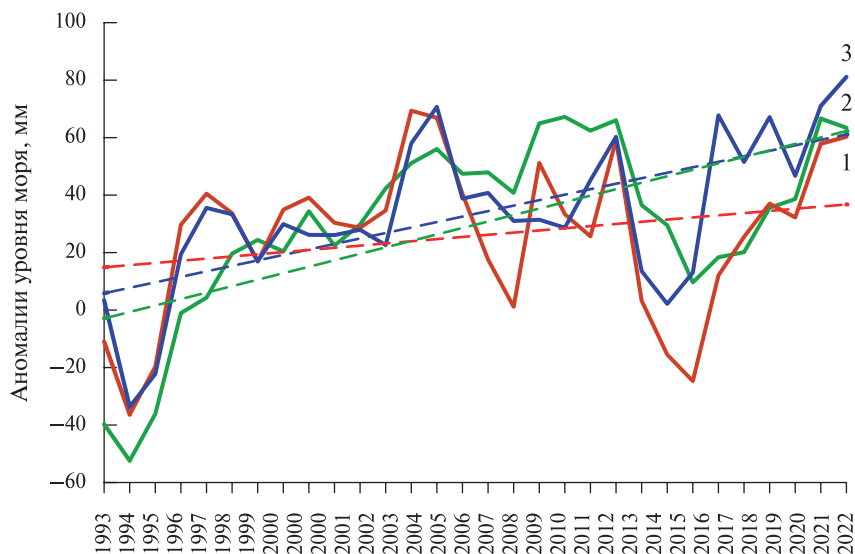


Рис. 3. Межгодовой ход аномалий морского уровня для отдельных разрезов на широте  $56^\circ$ , осреднённого за период 1993–2022 гг. 1 — разрез  $57-38^\circ$  з.д., 2 —  $38-28^\circ$  з.д., 3 —  $28-10^\circ$  з.д.

Другой важный фактор, влияющий на изменчивость теплосодержания водной массы, это суммарная теплоотдача в атмосферу ( $P + LE$ ), воздействие которой на формирование отрицательной плавучести и глубокой конвекции в этих морях очень значительно. Экстремальная особенность морей Лабрадор и Ирмингера состоит в том, что здесь из-за огромного перепада температуры между водой и воздухом резко возрастает турбулентный поток тепла  $P$  и, соответственно, его вклад в суммарную теплоотдачу. Если в среднем для Мирового океана соотношение  $P/LE = 0,12$  (Trenberth et al., 2009), то для моря Лабрадор, по данным используемого в данной работе архива реанализа Reanalysis-2, оно в два раза выше (0,23). В основном благодаря  $P$  выделена Лабрадорская ЭАЗО (Лаппо и др., 1990; Малинин, Шмакова, 2018). Корреляция  $P + LE$  с ТПО в море Лабрадор оказалась незначимой, а с  $P$  она равна  $-0,48$ . Хотя корреляция невысокая, она является значимой и правильно отражает физический смысл связи, поскольку при увеличении явного потока тепла в атмосферу температура воды уменьшается.

Рассмотрим теперь взаимосвязь ТПО в рассматриваемых морях с различными климатическими индексами (табл. 4). Прежде всего отметим почти функциональную связь между ТПО в морях Лабрадор и Ирмингера ( $r = 0,96$ ). Это означает, что теплосодержание вод в обоих морях можно рассматривать как единый комплекс. Действительно, при повышении АМО, ослаблении САК и GSNW ТПО в указанных морях повышается. Причём в связях ТПО с основными климатическими индексами отсутствует эффект ложной корреляции, ибо корреляция между САК, АМО и GSNW является незначимой. Оценки, приведённые в табл. 4, соответствуют работе (Яковлева, Башмачников, 2019), в которой выявлено наличие отрицательной корреляции теплосодержания моря Лабрадор с САК, положительной с АМО и отсутствие значимой связи с АО. Кроме того, в цитируемой работе показано, что с юга некоторое количество субтропических Атлантических вод поступает в море Лабрадор за счёт трансфронтального обмена через Северо-Атлантическое течение. При ослаблении индекса Гольфстрима и САК происходит усиление меридиональной циркуляции в атмосфере, вследствие чего меридиональный перенос вод на север, в том числе Северо-Атлантическим течением, повышается (Малинин, Ангунович, 2022). Это способствует некоторому повышению



ТПО и теплосодержания воды в море Лабрадор, что подтверждается отрицательными корреляционными связями в *табл. 4*.

*Таблица 4.* Оценки коэффициентов корреляции значений ТПО в северных морях с основными климатическими индексами СА. Значимые коэффициенты корреляции, при уровне значимости 0,05 по критерию Стьюдента, выделены полужирным шрифтом

ТПО	ТПО <sub>МЛ</sub>	ТПО <sub>МИ</sub>	ТПО <sub>ГК</sub>	ЭАЗО <sub>Нор</sub>	ЭАЗО <sub>Бер</sub>	САК	АМО	АО	GSNW
ТПО <sub>МЛ</sub>	1	<b>0,96</b>	0,33	<b>0,55</b>	0,02	<b>-0,46</b>	<b>0,65</b>	-0,22	<b>-0,63</b>
ТПО <sub>МИ</sub>	<b>0,96</b>	1	0,11	<b>0,62</b>	-0,21	<b>-0,64</b>	<b>0,46</b>	<b>-0,43</b>	<b>-0,68</b>
ТПО <sub>ГК</sub>	0,33	0,11	1	0,19	<b>0,77</b>	<b>0,51</b>	<b>0,77</b>	<b>0,67</b>	0,16

Что касается изменчивости ТПО в районе Гренландской котловины, то она не связана с ТПО в морях Лабрадор и Ирмингера (ТПО<sub>МЛ</sub> и ТПО<sub>МИ</sub>). При усилении АМО, АО, САК и Бермудской ЭАЗО ТПО в районе Гренландской котловины повышается. Эти оценки в основном согласуются с результатами, полученными в работах (Binns, 2015; Jie et al., 2018; Selyuzhenok et al., 2020). Поверхностная температура, характеризующая интенсивность глубокой конвекции в районе Гренландской котловины, хорошо коррелирует с уровнем на разрезе от 30 до 10° з. д. ( $r = 0,90$ ). Очевидно, усиление притока тёплых вод Северо-Атлантического течения в полярные широты влечёт за собой увеличение ТПО в районе Гренландской котловины и ослабление интенсивности глубокой конвекции. Климатические индексы наиболее тесно связаны с градиентом уровня  $\Delta h$  на восточном разрезе 28–10° з. д. При усилении Северо-Атлантического течения (повышении  $\Delta h$ ) происходит синхронное усиление САК, АМО, АО и Бермудской ЭАЗО.

В работе (Малинин, Ангудович, 2022) на основе данных об уровне океана была выполнена статистическая параметризация среднегодовых значений переноса воды на широте 26° с. ш. на север (АМОС) и юг ( $Q_{УМО}$ ). При использовании пошаговой регрессионной модели рассчитаны уравнения, которые по данным  $\Delta h$  описывают 85 и 77 %, а по данным  $h_{cp}$  — 92 и 88 % дисперсии рядов АМОС и  $Q_{УМО}$ . Поэтому выполнена проверка возможности аналогичной параметризации АМОС и  $Q_{УМО}$  для разреза на 56° с. ш., поскольку Северо-Атлантическое течение и течение Ирмингера представляют собой северную часть опрокидывающейся циркуляции (Rhein et al., 2011). С учётом значительной пространственной изменчивости колебаний уровня предварительно определялись значения  $\Delta h$  и  $h_{cp}$  на разрезах с интервалом от 7 до 10° (57–50, 50–40, ..., 20–10° з. д.). Расчёт пошаговых регрессий методом включения переменных (Малинин, 2008) позволил получить оптимальные модели для АМОС и  $Q_{УМО}$  в виде:

$$\text{АМОС} = -0,103\Delta h_{(50-40)} + 0,059\Delta h_{(20-10)} - 0,027\Delta h_{(30-20)} + 0,018, \quad (1)$$

$$Q_{УМО} = 0,428\Delta h_{(50-40)} + 0,187\Delta h_{(30-20)} + 0,171. \quad (2)$$

Аналогичным образом рассчитывались регрессионные модели для АМОС и  $Q_{УМО}$  по данным  $h_{cp}$ :

$$\text{АМОС} = -0,090h_{cp(57-50)} + 0,112h_{cp(40-30)} - 0,063h_{cp(30-20)} + 0,021, \quad (3)$$

$$Q_{УМО} = 0,70h_{cp(57-50)} - 0,069h_{cp(40-30)} + 0,053h_{cp(20-10)} + 0,014. \quad (4)$$

Отметим, переменные в этих уравнениях расположены по их значимости, т. е. по порядку включения в модель. Наиболее значимым при использовании  $\Delta h$  является разрез 50–40° з. д., а по данным  $h_{cp}$  — разрез 57–50° з. д. Результаты статистической оценки регрессионных моделей представлены в *табл. 5*. Нетрудно видеть очень высокую точность моделей, которая даже превышает точность аналогичных моделей на широте 26°. Очевидно, меридиональный перенос вод на север АМОС и обратный перенос  $Q_{УМО}$  на юг практически в равной степени репрезентативны как для САКВ, так и для СЦКВ.

Таблица 5. Статистические оценки регрессионных моделей (1)–(4) за период 2004–2022 гг.

	Коэффициент детерминации		Ошибка модели в долях СКО	
	$\Delta h$	$h_{\text{ср}}$	$\Delta h$	$h_{\text{ср}}$
АМОС	0,885	0,961	0,301	0,175
$Q_{\text{УМО}}$	0,891	0,939	0,218	0,171

Итак, полученные выше результаты свидетельствуют, что уровень океана на обоих разрезах (26 и 56° с. ш.) достаточно надёжно характеризует циркуляцию в системе циклонического и антициклонического круговорота вод, а также имеет значимые корреляционные связи с основными климатическими индексами СА. Это означает возможность введения интегрального уровня индекса Североатлантической циркуляции (ИСЦ, *англ.* North Atlantic Circulation index – NAC), который представляет собой разность морского уровня на широтных разрезах 26° (80–15° з. д.) и 56° (57–10° з. д.). Таким образом был рассчитан новый уровень индекс, косвенно характеризующий основную систему течений в Северной Атлантике.

В *табл. 6* приводится корреляция индекса ИСЦ с основными климатическими индексами СА за период 1993–2022 гг. Нетрудно видеть, что наиболее высокая линейная связь с климатическими индексами отмечается для ИСЦ, рассчитанного по градиенту среднего уровня на разрезах (ИСЦ<sub>hср</sub>). При этом реперной можно считать связь ИСЦ<sub>hср</sub> с САК ( $r = 0,85$ ). Именно САК в значительной степени определяет крупномасштабную циркуляцию вод в пределах САКВ и СЦКВ (Дворянинов и др., 2016; Малинин, Ангудович, 2022; Нестеров, 2013; Полонский, Сухонос, 2019 и др.).

Таблица 6. Оценки коэффициентов корреляции индекса ИСЦ с основными климатическими индексами СА за период 1993–2022 гг.

	ИСЦ <sub>Δh</sub>	ИСЦ <sub>hср</sub>
САК	<b>0,52</b>	<b>0,85</b>
GSNW	<b>0,46</b>	<b>0,68</b>
В ЭАЗО <sub>Бер</sub>	0,19	<b>0,56</b>
В ЭАЗО <sub>Ньюфаунд</sub>	–0,15	<b>0,47</b>
В ЭАЗО <sub>Лабр</sub>	<b>0,61</b>	0,19
В ЭАЗО <sub>Норв</sub>	0,27	–0,27
АМО	0,12	0,09
АО	<b>0,45</b>	<b>0,72</b>
Расход Флоридского течения	<b>0,39</b>	<b>0,73</b>
ТПО <sub>мл</sub>	–0,28	<b>–0,56</b>
ТПО <sub>ми</sub>	<b>–0,39</b>	<b>–0,73</b>
ТПО <sub>гк</sub>	<b>0,50</b>	<b>0,52</b>
АМОС (с 2004 г.)	–0,37	–0,26
$Q_{\text{УМО}}$ (с 2004 г.)	<b>0,57</b>	<b>0,68</b>

Положительная фаза САК и повышение индекса ИСЦ<sub>hср</sub> означают усиление западного геострофического переноса воздушных масс в умеренных широтах, ослабление меридиональной циркуляции в атмосфере, усиление северных ветров на море Лабрадор и смещение траекторий циклонов на север. Это, в конечном счёте, вызывает формирование отрицательной аномалии температуры воды в умеренных и субполярных широтах, в частности в морях

Лабрадор и Ирмингера, вследствие чего усиливается глубокая конвекция. При положительной фазе САК происходит усиление интенсивности САКВ, СЦКВ, зональной циркуляции водных масс и ослабление меридионального переноса на север АМОС, а также северной ветви Северо-Атлантического течения и течения Ирмингера, что приводит к уменьшению притока вод в полярные широты. Одновременно повышается расход Гольфстрима, который интенсифицирует САКВ, а в соответствии с усилением АО усиливается мощная полярная циклоническая циркуляция — циркумполярный вихрь (Zhou et al., 2001), понижается давление в Арктике и накапливается поверхностная вода в канадской части Арктического бассейна.

С переходом САК в отрицательную фазу и усилением процессов меридиональной циркуляции в атмосфере, наоборот, интенсивность Гольфстрима, круговоротов САКВ, СЦКВ, индекса АО ослабевает. В результате этого происходит увеличение потока тёплых вод в северные широты, интенсификация сброса распреснённых вод и льда через проливы Дэвисов, Фрама и Датский, формируются положительные аномалии температуры воды в морях Лабрадор и Ирмингера. Это приводит к ослаблению глубокой конвекции в этих морях.

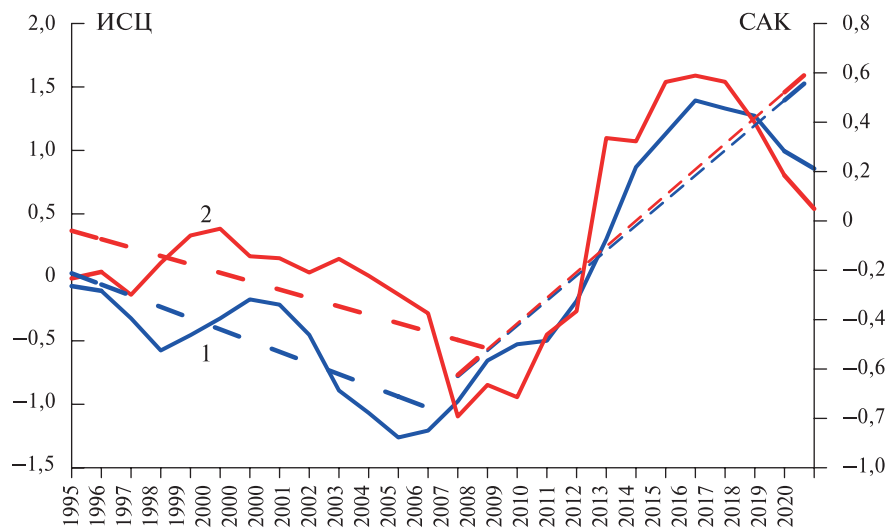


Рис. 4. Сопоставление стандартизованного индекса  $ИСЦ_{h_{ср}}$ , рассчитанного по средним значениям уровня  $h_{ср}$  (1), с индексом САК (2). Штриховыми линиями обозначены линейные тренды

Межгодовой ход индекса  $ИСЦ_{h_{ср}}$  представлен на рис. 4. Индекс является стандартизованным, т. е. его среднее значение равно нулю, а дисперсия равна единице. Действительно, в  $ИСЦ_{h_{ср}}$  и САК есть согласованный временной ход и близкие по величине локальные линейные тренды. Принципиально важно, что положительная и отрицательная фазы САК и  $ИСЦ_{h_{ср}}$  почти совпадают. Переход к положительной фазе в САК произошёл в 2013 г., а в  $ИСЦ_{h_{ср}}$  на один год раньше, в 2012 г. Отрицательный экстремум в  $ИСЦ_{h_{ср}}$  также отмечается раньше, чем в САК. Впрочем, рассматриваемый временной период довольно короткий, поэтому делать какие-либо окончательные выводы преждевременно. Тем не менее, несомненно, что интегральный индекс Североатлантической циркуляции можно рассматривать как показатель межгодовой изменчивости циркуляции вод и климата в Северной Атлантике.

## Заключение

Выполнен анализ взаимосвязи межгодовой изменчивости характеристик уровня океана, циркуляции вод и различных климатических индексов в Северной Атлантике. По альтиметрическим данным с 1993 г. на широтных разрезах  $26^\circ$  ( $80-15^\circ$  з.д.) и  $56^\circ$  ( $57-10^\circ$  з.д.) рассчитывались градиенты уровня ( $\Delta h$ ) на концах локальных разрезов, характеризующие геострофические

составляющие течения, а также среднее значение уровня на этих разрезах ( $h_{\text{ср}}$ ) за период 1993–2022 гг. Разрез на широте  $26^\circ$  является реперным для САКВ, а на широте  $56^\circ$  — для СЦКВ. На широте  $56^\circ$  выделены разрезы 57–38, 38–28 и 28–10° з.д. Первый разрез характеризует Лабрадорское течение и очаг глубокой конвекции моря Лабрадор, второй — течение Ирмингера, третий — наиболее мощное на данной широте Северо-Атлантическое течение. В межгодовом ходе  $h_{\text{ср}}$  на рассматриваемых разрезах чётко выделяются три фазы изменений уровня. Первая — интенсивное повышение до 2006 г., вторая — не менее интенсивное понижение до 2016 г., третья — новый быстрый рост уровня. Наиболее выраженный рост уровня отмечается на западном разрезе, самый слабый — на центральном.

Выявлено, что  $\Delta h$  и  $h_{\text{ср}}$  на локальных разрезах широты  $56^\circ$  имеют значимую корреляцию с климатическими индексами, особенно высокую на восточном разрезе 28–10°. Кроме того, высокая статистическая связь отмечается между изменениями уровня на разрезе и ТПО в морях Лабрадор, Ирмингера и в районе Гренландской котловины. В свою очередь, изменения поверхностной температуры контролируют среднюю температуру в слое 0–1000 м и, следовательно, изменения глубокой конвекции, формирующей североатлантическую глубинную водную массу и дающей начало глобальному океанскому конвейеру Брокера. Показано, что при повышении уровня происходит ослабление глубокой конвекции в морях Лабрадор и Ирмингера, а также в Гренландской котловине.

Выполнена параметризация переноса АМОС и  $Q_{\text{УМО}}$  для разреза на  $56^\circ$  с. ш. по данным об уровне. С учётом значительной пространственной изменчивости предварительно определялись значения  $\Delta h$  и  $h_{\text{ср}}$  на разрезах от 7 до 10° (57–50, 50–40, ..., 20–10° з.д.). Расчёт пошаговых регрессий методом включения переменных позволил получить оптимальные модели для АМОС и  $Q_{\text{УМО}}$ , которые даже с более высокой точностью (89–96 %), чем на  $26^\circ$  с. ш., описывают дисперсию временных рядов АМОС и  $Q_{\text{УМО}}$ .

Показано, что в качестве характеристики циркуляции в системе циклонического и антициклонического круговоротов вод (СЦКВ и САКВ) может быть использован интегральный индекс Североатлантической циркуляции (ИСЦ), который представляет собой разность морского уровня на широтных разрезах  $26^\circ$  ( $80$ – $15^\circ$  з.д.) и  $56^\circ$  ( $57$ – $10^\circ$  з.д.). Данный индекс имеет высокую линейную связь с климатическими индексами СА и с ТПО северных морей. Самая высокая корреляция отмечается с индексом САК ( $r = 0,85$ ), который в значительной степени контролирует атмосферную циркуляцию и изменение климата не только в СА, но и прилегающих регионах. В межгодовом ходе ИСЦ $_{h_{\text{ср}}}$  и САК отмечаются близкие по величине локальные линейные тренды. Принципиально важно, что положительная и отрицательная фазы САК и ИСЦ $_{h_{\text{ср}}}$  почти совпадают. Переход к положительной фазе в САК произошёл в 2013 г., а в ИСЦ $_{h_{\text{ср}}}$  на один год раньше, в 2012 г. Отрицательный экстремум в ИСЦ $_{h_{\text{ср}}}$  также отмечается раньше, чем в САК. Очевидно, что интегральный индекс Североатлантической циркуляции может служить важным показателем межгодовой изменчивости циркуляции вод и климата в Северной Атлантике.

Работа выполнена в рамках темы госзадания FSZU-2020-0009 (Российский государственный гидрометеорологический университет).

## Литература

1. Аксенов П. В., Иванов В. В. «Атлантификация» как вероятная причина сокращения площади морского льда в бассейне Нансена в зимний сезон // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Вып. 64. № 1. С. 42–54 (in Russian). DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-42-54.
2. Алексеев Г. В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // Фундам. и приклад. климатология. 2015. № 1. С. 11–26.
3. Белоненко Т. В., Колдунов А. В. О трендах стерических колебаний уровня в Северной Атлантике // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 5. С. 31–40. DOI: 10.31857/S020596140003236-0.
4. Белоненко Т. В., Федоров А. М. Стерические колебания уровня и глубокая конвекция в Лабрадорском море и море Ирмингера // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 3. С. 56–69. DOI: 10.7868/S0205961418030041.

5. *Дворянинов Г. С., Кубряков А. А., Сизов А. А. и др.* Северо-Атлантическое колебание — доминирующий фактор изменчивости циркуляционных океанических систем Северной Атлантики // Докл. Акад. наук. 2016. Т. 466. № 3. С. 345–349. DOI: 10.7868/S0869565216030208.
6. *Гладышев С. В., Гладышев В. С., Фалина А. С., Сарафанов А. А.* Зимняя конвекция в море Ирмингера в 2004–2014 гг. // Океанология. 2016. Т. 56. № 3. С. 353–363. <https://doi.org/10.7868/S0030157416030072>.
7. *Иванов В. В.* Современные изменения гидрометеорологических условий в Северном Ледовитом океане, связанные с сокращением морского ледяного покрова // Гидрометеорология и экология. 2021. № 64. С. 407–434. DOI: 10.33933/2713-3001-2021-64-407-434.
8. *Иванов В. В., Алексеев В. А., Репина И. А.* Возрастание воздействия атлантических вод на ледяной покров Северного Ледовитого океана // Международ. конф. памяти акад. А. М. Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата»: тр. М.: ГЕОС, 2014. С. 267–273.
9. *Крашенинникова С. Б.* Водные массы и переносы тепла в Северной Атлантике. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2019. 124 с.
10. *Лаппо С. С.* К вопросу о причинах адвекции тепла на север через экватор в Атлантическом океане // Исслед. процессов взаимодействия океана и атмосферы. М.: 1984. С. 125–129.
11. *Лаппо С. С., Гулев С. К., Рождественский А. Е.* Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан – атмосфера и энергоактивные зоны Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 336 с.
12. *Малинин В. Н.* Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2008. 408 с.
13. *Малинин В. Н.* Гольфстрим и климат Европы // Общество. Среда. Развитие. 2012. Вып. 22. № 1. С. 214–220.
14. *Малинин В. Н., Ангудович Я. И.* Изменчивость уровня и циркуляции океана в Северной Атлантике по спутниковой альтиметрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 281–294. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-281-294.
15. *Малинин В. Н., Вайновский П. А.* О межгодовой изменчивости наиболее интенсивных очагов источников и стока CO<sub>2</sub> в океане на основе данных наблюдений // Гидрометеорология и экология. 2022. № 66. С. 51–70. DOI: 10.33933/2713-3001-2022-66-51-70.
16. *Малинин В. Н., Шмакова В. Ю.* Изменчивость энергоактивных зон океана в Северной Атлантике // Фундам. и приклад. климатология. 2018. № 4. С. 55–70. DOI: 10.21513/2410-8758-2018-4-55-70.
17. *Нестеров Е. С.* Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: Триада. 2013. 144 с.
18. *Полонский А. Б., Сухонос П. А.* Североатлантическое колебание и бюджет тепла верхнего слоя Северной Атлантики // Фундам. и приклад. климатология. 2019. № 4. С. 67–100. DOI: 10.21513/0207-2564-2019-4-67-100.
19. *Смирнов Н. П., Воробьев В. Н., Дроздов В. В.* Циклонический центр действия атмосферы и океана в Северной Атлантике // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 15. С. 117–134.
20. *Степанов В. Н.* Атлантический меридиональный перенос тепла и вод по данным океанских моделей и наблюдений // Тр. Гидрометеоролог. научно-исслед. центра РФ. 2017. № 364. С. 104–130.
21. *Федоров А. М., Кубряков А. А., Белоненко Т. В.* Многолетние изменения крупномасштабной циркуляции в Северной Атлантике на основе спутниковых альтиметрических измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 7. С. 225–237. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-225-237.
22. *Федоров А. М., Башмачников И. Л., Белоненко Т. В.* Локализация областей глубокой конвекции в морях Северо-Европейского бассейна, Лабрадор и Ирмингера // Вестн. СПбГУ. Науки о Земле. 2018. Вып. 63. № 3. С. 354–362. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.306>.
23. *Яковлева Д. А., Башмачников И. Л.* Межгодовая изменчивость теплосодержания и содержания пресной воды в куполе холодных вод моря Лабрадор // Вестн. СПбГУ. Науки о Земле. 2019. Вып. 64. № 1. С. 136–158. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.108>.
24. *Androsov A., Rubino A., Romeiser R. et al.* Open-ocean convection in the Greenland Sea: Preconditioning through a mesoscale chimney and detectability in SAR imagery studied with a hierarchy of nested numerical models // Meteorologische Zeitschrift. 2005. Iss. 14. No. 6. P. 693–702. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2005/0078>.
25. *Arthun M. A., Eldevik T., Smedsdrud L. H. et al.* Quantifying the influence of Atlantic heat on the Barents Sea ice variability and retreat // J. Climate. 2012. No. 25. P. 4736–4743. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00466.1.
26. *Asbjørnsen H., Arthun M., Skagseth Ø., Eldevik T.* Mechanisms underlying recent Arctic Atlantification // Geophysical Research Letters. 2020. V. 47. Article e2020GL088036. <https://doi.org/10.1029/2020GL088036>.
27. *Vacon S.* The dense overflows from the Nordic Seas into the deep North Atlantic // ICES Symp. 100 Years of Science under ICES. 2002. P. 148–155. DOI: 10.17895/ices.pub.8741.

28. *Bailey D. A., Rhines P. B., Hakkinen S.* Formation and pathways of North Atlantic Deep Water in a coupled ice–ocean model of the Arctic–North Atlantic Oceans // *Climate Dynamics*. 2005. V. 25(5). P. 497–516. DOI 10.1007/s00382-005-0050-3/.
29. *Bashmachnikov I. L., Fedorov A. M., Golubkin P. A. et al.* Mechanisms of interannual variability of deep convection in the Greenland Sea // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2021. V. 174(128). Article 103557. 50 p. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2021.103557>.
30. *Binns P. E.* Atmosphere–ocean interactions in the Greenland Sea during solar cycles 23–24, 2002–2011 // *Ocean Science Discussions*. 2015. V. 12. Iss. 1. P. 103–134. <https://doi.org/10.5194/osd-12-103-2015>.
31. *Broecker W. S.* The great ocean conveyor // *Oceanography*. 1991. V. 4. No. 2. P. 79–89. <https://doi.org/10.5670/oceanog.191.07>.
32. *Buckley M. W., Marshall J.* Observations, inferences, and mechanisms of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: A review // *Reviews of Geophysics*. 2016. V. 54. Iss. 1. P. 5–63. <https://doi.org/10.1002/2015RG000493>.
33. *Centurioni L. R., Gould W. J.* Winter conditions in the Irminger Sea observed with profiling floats // *J. Marine Research*, 2004. V. 62. No. 3. P. 313–336. <https://doi.org/10.1357/0022240041446209>.
34. *Chafik L., Nilsen J. E., Dangendorf S. et al.* North Atlantic Ocean Circulation and decadal sea level change during the altimetry era // *Scientific Reports*. 2019. V. 9. Article 1041. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37603-6>.
35. *de Jong M. F., de Steur L.* Strong winter cooling of the Irminger Sea in winter 2014–2015, exceptional deep convection, and the emergence of anomalously low SST // *Geophysical Research Letters*. 2016. V. 43. Iss. 13. P. 1717–1734. <http://doi.org/10.1002/2016GL069596>.
36. *Dickson R., Brown J.* The production of North–Atlantic deep waters – sources, rates, and pathways // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1994. V. 99. P. 12319–12341. DOI: 10.1029/94JC00530.
37. *Dong S., Baringer M. O., Goni G. J.* Slow Down of the Gulf Stream during 1993–2016 // *Scientific Reports*, 2019. V. 9. Article 6672. 10 p. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42820-8>.
38. *Ezer T.* Detecting changes in the transport of the Gulf Stream and the Atlantic overturning circulation from coastal sea level data: The extreme decline in 2009–2010 and estimated variations for 1935–2012 // *Global and Planetary Change*. 2015. V. 129. P. 23–36. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2015.03.002.
39. *Frajka-Williams E., Anson I. J., Baehr J. et al.* Atlantic Meridional Overturning Circulation: Observed transport and variability // *Frontiers in Marine Science*. 2019. V. 6. Article 260. 18 p. DOI: 10.3389/fmars.2019.00260.
40. *Frajka-Williams E., Moat B. I., Smeed D. A. et al.* Atlantic meridional overturning circulation observed by the RAPID-MOCHA-WBTS (RAPID-Meridional Overturning Circulation and Heatflux Array-Western Boundary Time Series) array at 26N from 2004 to 2020 (v2020.1). NERC EDS British Oceanographic Data Centre NOC. 2021. DOI: 10.5285/cc1e34b3-3385-662b-e053-6c86abc03444.
41. *Higginson S., Thompson K. R., Huang J. et al.* The mean surface circulation of the North Atlantic sub-polar gyre: A comparison of estimates derived from new gravity and oceanographic measurements // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2011. V. 116. Iss. C8. <https://doi.org/10.1029/2010JC006877>.
42. *Ivchenko V. O., Sidorenko D., Danilov S. et al.* Can sea surface height be used to estimate oceanic transport variability? // *Geophysical Research Letters*. 2011. V. 38. Iss. 11. 5 p. DOI: 10.1029/2011GL047387.
43. *Jie C., Yuchao D., Jian W. et al.* The sea surface temperature configuration of Greenland Sea-subpolar region of North Atlantic and the summer rainfall anomaly in low-latitude highlands of China // *Intern. J. Climatology*. 2018. V. 38. Iss. 7. P. 3082–3089. <https://doi.org/10.1002/joc.5484>.
44. *Johannessen O. M., Lygre K., Eldevik T.* Convective chimneys and plumes in the Northern Greenland Sea // *The Nordic Seas: An Integrated Perspective: Geophysical Monograph* / eds. Drange H., Dokken T., Furevik T. Washington, D. C.: Publ. American Geophysical Union, 2013. V. 158. P. 251–272. <http://doi.org/10.1029/158GM17>.
45. *Kopp R. E.* Does the mid-Atlantic United States sea level acceleration hot spot reflect ocean dynamic variability? // *Geophysical Research Letters*. 2013. V. 40. Iss. 15. P. 3981–3985. <https://doi.org/10.1002/grl.50781>.
46. *Lavender K. L., Davis R. E., Owens W. B.* Observations of open-ocean deep convection in the Labrador Sea from subsurface floats // *J. Physical Oceanography*. 2002. V. 32. Iss. 2. P. 511–526. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2002\)0322.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2002)0322.0.CO;2).
47. *Lavender K. L., Moret-Ferguson S., Maximenko N. et al.* Plastic accumulation in the north Atlantic subtropical gyre // *Science*. 2010. V. 329. Iss. 5996. Article 5996. 5 p. DOI: 10.1126/science.1192321.
48. *Levitus S., Antonov J. I., Boyer T. P. et al.* World Ocean heat content and thermosteric sea level change (0–2000 m), 1955–2010 // *Geophysical Research Letters*. 2012. V. 39. Article L10603. 5 p. DOI: 10.1029/2012GL051106.
49. *Marshall J., Schott F.* Open-ocean convection: Observations, theory, and models // *Reviews of Geophysics*. 1999. V. 37. Iss. 1. P. 1–64. <https://doi.org/10.1029/98RG02739>.

50. Marshall J., Dobson F., Moore K. et al. The Labrador Sea deep convection experiment // Bull. American Meteorological Society. 1998. V. 79. Iss. 10. P. 2033–2058. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<2033:TLSDCE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<2033:TLSDCE>2.0.CO;2).
51. Marzocchi A., Hirschi J.J.-M., Holliday N.P. et al. The North Atlantic subpolar circulation in an eddy-resolving global ocean model // J. Marine Systems. 2014. V. 142. P. 126–143. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.10.007>.
52. McCarthy G. D., Smeed D. A., Johns W. E. et al. Measuring the Atlantic meridional overturning circulation at 26°N // Progress in Oceanography. 2015. V. 130. P. 91–111. DOI: 10.1016/j.pocean.2014.10.006.
53. Moore G. W. K., Våge K., Pickart R. S., Renfrew I. A. Decreasing intensity of open-ocean convection in the Greenland and Iceland seas // Nature Climate Change. 2015. V. 5. P. 877–882. <https://doi.org/10.1038/nclimate2688>.
54. Pickart R. S., Spall M. A., Ribergaard M. H. et al. (2003a) Deep convection in the Irminger Sea forced by the Greenland tip jet // Nature. 2003. V. 424(6945). P. 152–156. DOI: 10.1038/nature01729.
55. Pickart R. S., Straneo F., Moore G. W. K. (2003b) Is Labrador Sea Water formed in the Irminger basin? // Deep Sea Research. Part I. Oceanographic Research Papers. 2003. V. 50(1). P. 23–52. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(02\)00134-6](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(02)00134-6).
56. Polyakov I. V., Pnyushkov A. V., Alkire M. B. et al. Greater role for Atlantic inflows on sea–ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // Science. 2017. V. 356. No. 6335. P. 285–291. <https://doi.org/10.1126/science.aai8204>.
57. Repschläger J., Garbe-Schönberg D., Weinelt M. et al. Holocene evolution of the North Atlantic subsurface transport // Climate of the Past. 2017. V. 13(4). P. 333–344. DOI: 10.5194/cp-13-333-2017.
58. Rhein M., Kieke D., Huettl-Kabus S. et al. Deep water formation, the subpolar gyre, and the meridional overturning circulation in the subpolar North Atlantic // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2011. V. 58. No. 17–18. P. 1819–1832. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2010.10.061>.
59. Rhein M., Kieke D., Steinfeldt R. Advection of North Atlantic Deep Water from the Labrador Sea to the Southern Hemisphere // J. Geophysical Research. 2015. V. 120. No 4. P. 2471–2487. DOI: 10.1002/2014JC010605.
60. Selyuzhenok V., Bashmachnikov I., Ricker R. et al. Sea ice volume variability and water temperature in the Greenland Sea // The Cryosphere. 2020. No. 14. P. 477–495. <https://doi.org/10.5194/tc-14-477-2020>.
61. Srokosz M., Baringer M., Bryden H. et al. Past, present, and future changes in the Atlantic meridional overturning circulation // Bull. American Meteorological Society. 2012. V. 93. No. 11. P. 1663–1676. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00151.1>.
62. Stramma L., Siedler G. Seasonal changes in the North Atlantic subtropical gyre // J. Geophysical Research. 1988. V. 93. Iss. C7. P. 8111–8118. <https://doi.org/10.1029/JC093iC07p08111>.
63. Trenberth K. E., Fasullo J. T., Kiehl J. Earth's global energy budget // Bull. American Meteorological Society. 2009. V. 90. No. 3. P. 311–323. DOI: 10.1175/2008bams2634.1.
64. Våge K., Pickart R. S., Thierry V. et al. Surprising return of deep convection to the subpolar North Atlantic Ocean in winter 2007–2008 // Nature Geoscience, 2009. No. 2. P. 67–72. <https://doi.org/10.1038/ngeo382>.
65. Wadhams P., Holfort J., Hansen E. et al. A deep convective chimney in the winter Greenland Sea // Geophysical Research Letters. 2002. V. 29. No. 10. P. 76-1–76-4. <https://doi.org/10.1029/2001gl014306>.
66. Zhou S., Miller A. J., Wang J. et al., Trends of NAO and AO and their associations with stratospheric processes // Geophysical Research Letters. 2001. V. 28. P. 4107–4110. DOI: 10.1029/2001GL013660.

## Sea level as an indicator of interannual variability of water circulation and climate in the North Atlantic

V. N. Malinin, Ya. I. Angudovich

*Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg 192007, Russia  
E-mail: yaromir.angudovich@mail.ru*

The paper analyses the relationship between the interannual variability of sea level characteristics, water circulation, and various climatic indices in the North Atlantic. Sea level gradients ( $\Delta h$ ) at the ends of local sections characterising the geostrophic current components, as well as the average sea level value at these sections ( $h_{av}$ ) have been calculated at latitudinal sections of 26° N (80–15° W) and

56° N (57–10° W) for the period 1993–2022 according to altimetric data available since 1993. The section at latitude 26° N serves as a reference for the STG (Subtropical Gyre), and the one at latitude 56° — for the SPG (Subpolar Gyre). It is shown that  $\Delta h$  and  $h_{av}$  in the local sections (57–38, 38–28 and 28–10° W) of latitude 56° N have a significant correlation with climatic indices, being especially high for the eastern 28–10° W section. A high statistical relationship has been noted between sea level changes in the 56° N section and sea surface temperature in the northern seas, which shows the weakening of the deep-sea convection with the sea level rise in the Labrador and Irminger seas, as well as in the Greenland Basin. Statistical parameterization of AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation) and  $Q_{UMO}$  (Reverse water flow due to recirculation of the subtropical gyre) has been carried out for the latitude section at 56° N according to the sea level data. The accuracy of estimating AMOC and  $Q_{UMO}$  is shown to be in the range of 89–96 % of the contribution to variance. The integral North Atlantic Circulation index representing the difference in the sea level at latitudinal sections of 26° (80–15° W) and 56° (57–10° W) can be used as a characteristic of the circulation in the system of cyclonic and anticyclonic gyres (SPG and STG). Taking into account its high statistical relationship with the North Atlantic Oscillation and other indices, it can serve as an important indicator of interannual variability of water circulation and climate in the North Atlantic.

**Keywords:** North Atlantic, sea level, water circulation, deep convection, climate indices

Accepted: 10.09.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-335-353

## References

1. Aksenov P. V., Ivanov V. V., “Atlantification” as a possible cause for reducing of the sea-ice cover in the Nansen Basin in winter, *Arctic and Antarctic Research*, 2018, Vol. 64, No. 1, pp. 42–54 (in Russian), <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2018-64-1-42-54>.
2. Alekseev G. V., Development and amplification of global warming in the Arctic, *Fundamental and applied climatology*, 2015, No. 1, pp. 11–26 (in Russian).
3. Belonenko T. V., Fedorov A. M., Steric level fluctuations and deep convection in the Labrador and Irminger Seas, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, Vol. 54, No. 9, pp. 1039–1049 (in Russian), DOI: 10.1134/S0001433818090086.
4. Belonenko T. V., Koldunov A. V., On the trends of steric level fluctuations in the North Atlantic, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, Vol. 55, No. 9, pp. 1106–1113 (in Russian), DOI: 10.1134/S0001433819090081.
5. Dvoryaninov G. S., Kubryakov A. A., Sizov A. A. et al., The North Atlantic: A dominant factor in variations of oceanic circulation systems of the Atlantic Ocean, *Doklady Earth Sciences*, 2016, Vol. 466, No. 1, pp. 100–104 (in Russian), DOI: 10.1134/S1028334X16010207.
6. Gladyshev S. V., Gladyshev V. S., Falina A. S., Sarafanov A. A., Winter convection in the Irminger Sea in 2004–2014, *Oceanology*, 2016, Vol. 56, No. 3, pp. 326–335 (in Russian), DOI: 10.1134/S0001437016030073.
7. Ivanov V. V., Present changes in hydrometeorological conditions in the Arctic Ocean associated with reduction of the sea ice cover, *Hydrometeorology and Ecology*, 2021, No. 64, pp. 407–434 (in Russian), DOI: 10.33933/2713-3001-2021-64-407-434.
8. Ivanov V. V., Alekseev V. A., Repina I. A., Increasing impact of Atlantic waters on the ice cover of the Arctic Ocean, *Mezhdunarodnaya konferentsiya pamyati akademika A. M. Obukhova “Turbulentnost’, dinamika atmosfery i klimata”*: trudy (Turbulence, dynamics of the atmosphere and climate: Proc. Intern. Conf. in Memory of Academician A. M. Obukhov), Moscow: GEOS, 2014, pp. 267–273 (in Russian).
9. Krashenninnikova S. B., *Vodnye massy i perenosy tepla v Severnoi Atlantike* (Water mass and heat transfer in the North Atlantic), Simferopol: IT “ARIAL”, 2019, 124 p. (in Russian).
10. Lappo S. S., On the question of the causes of heat advection northward across the equator in the Atlantic Ocean, In: *Issledovanie protsessov vzaimodeistviya okeana i atmosfery* (Investigation of the processes of interaction between the ocean and the atmosphere), Moscow, 1984, pp. 125–129 (in Russian).
11. Lappo S. S., Gulev S. K., Rozhdestvensky A. E., *Krupnomasshtabnoe teplovoe vzaimodeistvie v sisteme okean – atmosfera i energoaktivnye zony Mirovogo okeana* (Large-scale heat interaction in the Ocean-Atmosphere system and energetically active zones of the world ocean), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990, 336 p. (in Russian).
12. Malinin V. N., *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoi informatsii* (Statistical methods of analysis of hydrometeorological information), Saint Petersburg: RGGMU, 2008, 408 p. (in Russian)
13. Malinin V. N., The Gulf Stream and the climate of Europe, *Society. Wednesday. Development*, 2012, Issue 22, No. 1, pp. 214–220 (in Russian).



14. Malinin V.N., Angudovich Ya. I., Variability of sea level and circulation in the North Atlantic from satellite altimetry, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 281–294 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-281-294.
15. Malinin V.N., Vainovsky P.A., On the interannual variability of the most intense sources and sinks of CO<sub>2</sub> in the ocean based on observational data, *Hydrometeorology and Ecology*, 2022, No. 66, pp. 51–70 (in Russian), DOI: 10.33933/2713-3001-2022-66-51-70.
16. Malinin V.N., Shmakova V.Yu., Variability of the energy-active ocean zones in North Atlantic, *Fundamental and applied climatology*, 2018, No. 4, pp. 55–70 (in Russian), DOI: 10.21513/2410-8758-2018-4-55-70.
17. Nesterov E.S., *Severoatlanticheskoe kolebanie: atmosfera i okean* (North Atlantic oscillation: atmosphere and ocean), Moscow: Triada, 2013, 144 p. (in Russian).
18. Polonsky A.B., Sukhonos P.A., North Atlantic oscillation and upper layer heat balance in the North Atlantic, *Fundamental and applied climatology*, 2019, No. 4, pp. 67–100 (in Russian), DOI: 10.21513/0207-2564-2019-4-67-100.
19. Smirnov N.P., Vorobyov V.N., Drozdov V.V., Cyclonic center of atmospheric and Ocean action in the North Atlantic, *Scientific Notes of the Russian State University*, 2010, No. 15, pp. 117–134 (in Russian).
20. Stepanov V.N., Atlantic heat and water transfer according to ocean models and observations, *Proc. Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*, 2017, No. 364, pp. 104–130 (in Russian).
21. Fedorov A.M., Kubryakova A.A., Belonenko T.V., Long-term changes in large-scale circulation in the North Atlantic Ocean based on satellite altimetry, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 7, pp. 225–237 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-225-237.
22. Fedorov A.M., Bashmachnikov I.L., Belonenko T.V., Localization of areas of deep convection in the nordic seas, the Labrador Sea and the Irminger Sea, *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2018, Vol. 63, No. 3, pp. 345–362 (in Russian), <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.306>.
23. Yakovleva D.A., Bashmachnikov I.L., Interannual variations of heat and freshwater contents in the cold water dome of the Labrador Sea, *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2019, Issue 64, No. 1, pp. 136–158 (in Russian), DOI: 10.21638/spbu07.2019.108.
24. Androsov A., Rubino A., Romeiser R. et al., Open-ocean convection in the Greenland Sea: Preconditioning through a mesoscale chimney and detectability in SAR imagery studied with a hierarchy of nested numerical models, *Meteorologische Zeitschrift*, 2005, Issue 14, No. 6, pp. 693–702 (in Russian), <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2005/0078>.
25. Årthun M.A., Eldevik T., Smedsdrud L.H. et al., Quantifying the influence of Atlantic heat on the Barents Sea ice variability and retreat, *J. Climate*, 2012, No. 25, pp. 4736–4743, DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00466.1.
26. Asbjørnsen H., Årthun M., Skagseth Ø., Eldevik T., Mechanisms underlying recent Arctic Atlantification, *Geophysical Research Letters*, 2020, Vol. 47. Article e2020GL088036, <https://doi.org/10.1029/2020GL088036>.
27. Bacon S., The dense overflows from the Nordic Seas into the deep North Atlantic, *ICES Symp. 100 Years of Science under ICES*, 2002, pp. 148–155, DOI: 10.17895/ices.pub.8741.
28. Bailey D.A., Rhines P.B., Hakkinen S., Formation and pathways of North Atlantic deep water in a coupled ice – ocean model of the Arctic – North Atlantic Oceans, *Climate Dynamics*, 2005, Vol. 25(5), pp. 497–516, DOI 10.1007/s00382-005-0050-3/.
29. Bashmachnikov I.L., Fedorov A.M., Golubkin P.A. et al., Mechanisms of interannual variability of deep convection in the Greenland Sea, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2021, Vol. 174(128), Article 103557, 50 p., <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2021.103557>.
30. Binns P.E., Atmosphere – ocean interactions in the Greenland Sea during solar cycles 23–24, 2002–2011, *Ocean Science Discussions*, 2015, Vol. 12, Issue 1, pp. 103–134, <https://doi.org/10.5194/osd-12-103-2015>.
31. Broecker W.S., The great ocean conveyor, *Oceanography*, 1991, Vol. 4, No. 2, pp. 79–89, <https://doi.org/10.5670/oceanog.191.07>.
32. Buckley M.W., Marshall J., Observations, inferences, and mechanisms of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: A review, *Reviews of Geophysics*, 2016, Vol. 54, Issue 1, pp. 5–63, <https://doi.org/10.1002/2015RG000493>.
33. Centurioni L.R., Gould W.J., Winter conditions in the Irminger Sea observed with profiling floats, *J. Marine Research*, 2004, Vol. 62, No. 3, pp. 313–336, <https://doi.org/10.1357/0022240041446209>.
34. Chafik L., Nilsen J.E., Dangendorf S. et al., North Atlantic Ocean circulation and decadal sea level change during the altimetry era, *Scientific Reports*, 2019, Vol. 9, Article 1041, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37603-6>.
35. de Jong M.F., de Steur L., Strong winter cooling of the Irminger Sea in winter 2014–2015, exceptional deep convection, and the emergence of anomalously low SST, *Geophysical Research Letters*, 2016, Vol. 43, Issue 13, pp. 1717–1734, <http://doi.org/10.1002/2016GL069596>.
36. Dickson R., Brown J., The production of North–Atlantic deep waters – sources, rates, and pathways, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1994, Vol. 99, pp. 12319–12341, DOI: 10.1029/94JC00530.

37. Dong S., Baringer M. O., Goni G. J., Slow Down of the Gulf Stream during 1993–2016, *Scientific Reports*, 2019, Vol. 9, Article 6672, 10 p., <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42820-8>.
38. Ezer T., Detecting changes in the transport of the Gulf Stream and the Atlantic overturning circulation from coastal sea level data: The extreme decline in 2009–2010 and estimated variations for 1935–2012, *Global and Planetary Change*, 2015, Vol. 129, pp. 23–36, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2015.03.002.
39. Frajka-Williams E., Ansorge I. J., Baehr J. et al., Atlantic Meridional Overturning Circulation: Observed transport and variability, *Frontiers in Marine Science*, 2019, Vol. 6, Article 260, 18 p., DOI: 10.3389/fmars.2019.00260.
40. Frajka-Williams E., Moat B. I., Smeed D. A. et al., *Atlantic meridional overturning circulation observed by the RAPID-MOCHA-WBTS (RAPID-Meridional Overturning Circulation and Heatflux Array-Western Boundary Time Series) array at 26N from 2004 to 2020 (v2020.1)*, NERC EDS British Oceanographic Data Centre NOC, 2021, DOI: 10.5285/cc1e34b3-3385-662b-e053-6c86abc03444.
41. Higginson S., Thompson K. R., Huang J. et al., The mean surface circulation of the North Atlantic sub-polar gyre: A comparison of estimates derived from new gravity and oceanographic measurements, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2011, Vol. 116, Issue C8, <https://doi.org/10.1029/2010JC006877>.
42. Ivchenko V. O., Sidorenko D., Danilov S. et al., Can sea surface height be used to estimate oceanic transport variability? *Geophysical Research Letters*, 2011, Vol. 38, Issue 11, 5 p., DOI: 10.1029/2011GL047387.
43. Jie C., Yuchao D., Jian W. et al., The sea surface temperature configuration of Greenland Sea-subpolar region of North Atlantic and the summer rainfall anomaly in low-latitude highlands of China, *Intern. J. Climatology*, 2018, V. 38, Iss. 7, pp. 3082–3089, <https://doi.org/10.1002/joc.5484>.
44. Johannessen O. M., Lygre K., Eldevik T., Convective chimneys and plumes in the Northern Greenland Sea, In: *The Nordic Seas: An Integrated Perspective: Geophysical Monograph*, Drange H., Dokken T., Furevik T. et al. (eds.), Washington, D. C.: Publ. American Geophysical Union, 2013, Vol. 158, pp. 251–272, <http://doi.org/10.1029/158GM17>.
45. Kopp R. E., Does the mid-Atlantic United States sea level acceleration hot spot reflect ocean dynamic variability? *Geophysical Research Letters*, 2013, Vol. 40, Issue 15, pp. 3981–3985, <https://doi.org/10.1002/grl.50781>.
46. Lavender K. L., Davis R. E., Owens W. B., Observations of open-ocean deep convection in the Labrador Sea from subsurface floats, *J. Physical Oceanography*, 2002, V. 32, Issue 2, pp. 511–526, [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2002\)0322.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2002)0322.0.CO;2).
47. Lavender K. L., Moret-Ferguson S., Maximenko N. et al., Plastic accumulation in the north Atlantic subtropical gyre, *Science*, 2010, Vol. 329, Issue 5996, Article 5996, 5 p., DOI: 10.1126/science.1192321.
48. Levitus S., Antonov J. I., Boyer T. P. et al., World Ocean heat content and thermosteric sea level change (0–2000 m), 1955–2010, *Geophysical Research Letters*, 2012, Vol. 39, Article L10603, 5 p., DOI: 10.1029/2012GL051106.
49. Marshall J., Schott F., Open-ocean convection: Observations, theory, and models, *Reviews of Geophysics*, 1999, Vol. 37, Issue 1, pp. 1–64, <https://doi.org/10.1029/98RG02739>.
50. Marshall J., Dobson F., Moore K. et al., The Labrador Sea deep convection experiment, *Bull. American Meteorological Society*, 1998, Vol. 79, Issue 10, pp. 2033–2058, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<2033:TLSDCE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<2033:TLSDCE>2.0.CO;2).
51. Marzocchi A., Joël J.-M., Hirschi N. et al., The North Atlantic subpolar circulation in an eddy-resolving global ocean model, *J. Marine Systems*, 2014, Vol. 142, pp. 126–143, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.10.007>.
52. McCarthy G. D., Smeed D. A., Johns W. E. et al., Measuring the Atlantic meridional overturning circulation at 26°N, *Progress in Oceanography*, 2015, Vol. 130, pp. 91–111, DOI: 10.1016/j.pocean.2014.10.006.
53. Moore G. W. K., Våge K., Pickart R. S., Renfrew I. A., Decreasing intensity of open-ocean convection in the Greenland and Iceland seas, *Nature Climate Change*, 2015, Vol. 5, pp. 877–882, <https://doi.org/10.1038/nclimate2688>.
54. Pickart R. S., Spall M. A., Ribergaard M. H. et al. (2003a), Deep convection in the Irminger Sea forced by the Greenland tip jet, *Nature*, 2003, Vol. 424(6945), pp. 152–156, DOI: 10.1038/nature01729.
55. Pickart R. S., Straneo F., Moore G. W. K. (2003b), Is Labrador Sea water formed in the Irminger basin?, *Deep Sea Research. Part I. Oceanographic Research Papers*, 2003, Vol. 50(1), pp. 23–52, [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(02\)00134-6](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(02)00134-6).
56. Polyakov I. V., Pnyushkov A. V., Alkire M. B. et al., Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean., *Science*, 2017, Vol. 356, No. 6335, pp. 285–291, <https://doi.org/10.1126/science.aai8204>.
57. Repschläger J., Garbe-Schönberg D., Weinelt M., Schneider R., Holocene evolution of the North Atlantic subsurface transport, *Climate of the Past*, 2017, Vol. 13(4), pp. 333–344, DOI: 10.5194/cp-13-333-2017.
58. Rhein M., Kieke D., Huettl-Kabus S. et al., Deep water formation, the subpolar gyre, and the meridional overturning circulation in the subpolar North Atlantic, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2011, Vol. 58, No. 17–18, pp. 1819–1832, <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2010.10.061>.

59. Rhein M., Kieke D., Steinfeldt R., Advection of North Atlantic deep water from the Labrador Sea to the Southern Hemisphere, *J. Geophysical Research*, 2015, Vol. 120, No. 4, pp. 2471–2487, DOI: 10.1002/2014JC010605.
60. Selyuzhenok V., Bashmachnikov I., Ricker R. et al., Sea ice volume variability and water temperature in the Greenland Sea, *The Cryosphere*, 2020, No. 14, pp. 477–495, <https://doi.org/10.5194/tc-14-477-2020>.
61. Srokosz M., Baringer M., Bryden H. et al., Past, present, and future changes in the Atlantic meridional overturning circulation, *Bull. American Meteorological Society*, 2012, Vol. 93, No. 11, pp. 1663–1676, <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00151.1>.
62. Stramma L., Siedler G., Seasonal changes in the North Atlantic subtropical gyre, *J. Geophysical Research*, 1988, Vol. 93, Issue C7, pp. 8111–8118, <https://doi.org/10.1029/JC093iC07p08111>.
63. Trenberth K. E., Fasullo J. T., Kiehl J., Earth's global energy budget, *Bull. American Meteorological Society*, 2009, Vol. 90, No. 3, pp. 311–232, DOI: 10.1175/2008bams2634.1.
64. Våge K., Pickart R. S., Thierry V. et al., Surprising return of deep convection to the subpolar North Atlantic Ocean in winter 2007–2008, *Nature Geoscience*, 2009, No. 2, pp. 67–72, <https://doi.org/1038/ngeo382>.
65. Wadhams P., Holfort J., Hansen E. et al., A deep convective chimney in the winter Greenland Sea, *Geophysical Research Letters*, 2002, Vol. 29, No. 10, pp. 76-1–76-4, <https://doi.org/10.1029/2001gl014306>.
66. Zhou S., Miller A. J., Wang J. et al., Trends of NAO and AO and their associations with stratospheric processes, *Geophysical Research Letters*, 2001, Vol. 28, pp. 4107–4110, DOI: 10.1029/2001GL013660.