Межгодовая изменчивость уровня океана в Северной Атлантике и его влияние на характеристики климата в Баренцевом море

Я. И. Ангудович, В. Н. Малинин

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

В развитие предыдущих исследований авторов на основе комплексного анализа многолетних спутниковых данных (альтиметрия, пассивное микроволновое зондирование, атмосферный реанализ) и натурных наблюдений исследуется взаимосвязь межгодовой изменчивости уровня океана в Северной Атлантике с характеристиками климата в регионе и Западной Арктике. Предложен новый интегральный индекс циркуляции ΔKW-P (*англ.* Key West – Portland), представляющий собой градиент уровня моря между непрерывными многолетними рядами береговых станций US Coast Guard Sector Key West (Флорида) и US Coast Guard Station South Portland (Южный Портленд, залив Мэн). Показано, что индекс ΔKW-P эффективно отражает динамику взаимодействия субтропического антициклонического круговорота вод (САКВ) и субполярного циклонического круговорота вод (СЦКВ). Индекс ΔKW-P демонстрирует высокую корреляцию ($r = 0{,}74$ для среднегодовых значений) с интегральным индексом североатлантической циркуляции (ИСЦ), рассчитанным по спутниковым альтиметрическим данным ранее, что подтверждает его репрезентативность. Выявлены устойчивые статистически значимые связи между ΔKW-P и ведущими климатическими индексами, включая Арктическую осцилляцию (АО) ($r = 0{,}81...0{,}64$), Североатлантическое колебание (САК) ($r = 0{,}87...0{,}77$ для зимы) и индекс «северной стены» Гольфстрима GSNW (*англ.* Gulfstream North Wall) ($r = 0{,}62...0{,}67$). С помощью пошагового множественного регрессионного анализа доказано, что ΔKW-P представляется ключевым предиктором климатических параметров в Баренцевом море, внося значительный вклад в объяснение дисперсии температуры приземного воздуха (43,7 %), температуры воды Мурманского течения (37,3 %) и площади морского льда (~11 %). Результаты подчёркивают, что многолетние записи прибрежного уровня моря содержат ценную информацию о динамике климатической системы Северной Атлантики. Предложенный индекс ΔKW-P, основанный на данных, охватывающих период с 1948 по 2023 г., предоставляет надёжный инструмент для анализа долгопериодных изменений климата и циркуляции, давая важные сведения о процессах «атлантификации» Арктики.

Ключевые слова: Северная Атлантика, спутниковые данные, морской уровень, циркуляция вод, Баренцево море, климатические индексы

Одобрена к печати: 16.02.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-9-26

Введение

Главной закономерностью циркуляции вод в Северной Атлантике (СА) следует считать наличие двух мощных круговоротов вод: субтропического антициклонического круговорота вод (САКВ) и субполярного циклонического круговорота вод (СЦКВ). Эти системы играют ключевую роль в формировании климата, определяя перенос и пространственное распределение тепла, солёности и других важнейших океанологических характеристик. Субтропический антициклонический круговорот представляет собой одну из ключевых циркуляционных систем Северной Атлантики, охватывающую пространство между 10 и 45° с. ш. ((Карлин и др., 2013; Малинин, 2012; Chafik et al., 2019; Stramma, Siedler, 1988) и др.). Этот круговорот формируется под совместным влиянием пассатов в тропических широтах и западного переноса в умеренных широтах, создавая замкнутую систему течений, включающую такие мощные течения, как Гольфстрим, Северное пассатное, Флоридское, широтное Азорское и восточное пограничное Канарское (*рис. 1*). Пространственно-временная изменчивость атмосферной западной циркуляции значительно выше, чем у пассатных

ветров, обеспечивающих высокую устойчивость Северного пассатного течения. По сути, стабильность пассатов Северного полушария в значительной степени обеспечивает устойчивость Гольфстрима и всей системы САКВ (Малинин, 2012).

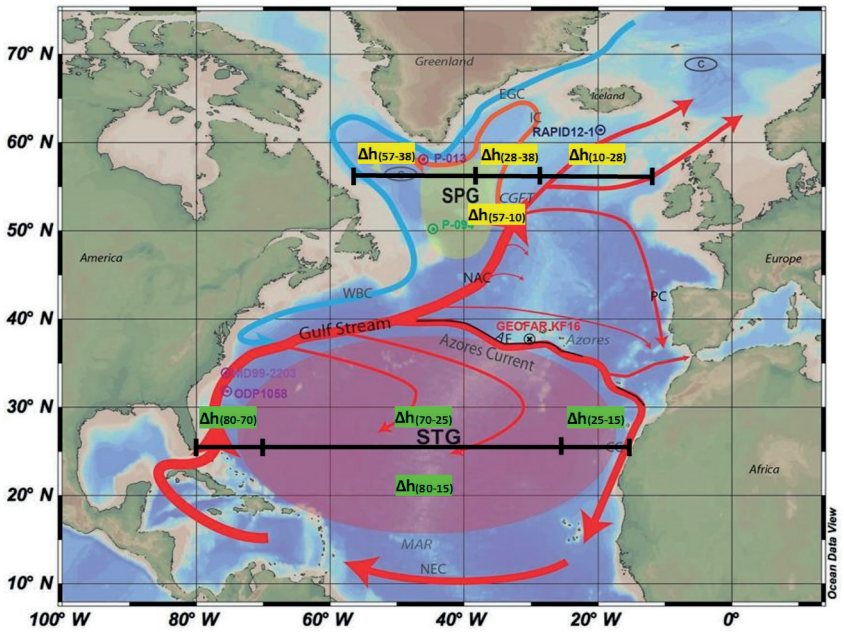


Рис. 1. Схема циркуляции вод в Северной Атлантике (Repschläger et al., 2017). STG (*англ.* subtropical gyre) — САКВ; SPG (*англ.* Subpolar Gyre) — СЦКВ; NAC (*англ.* North Atlantic Current) — Северо-Атлантическое течение; WBC (*англ.* Western Boundary Current) — Западное пограничное течение. Красные стрелки — тёплые поверхностные течения; синие стрелки — холодные глубинные течения. Знаком "©" обозначены регионы формирования интенсивной конвекции. На Срединно-Атлантическом хребте обозначена аббревиатура MAR; NEC (*англ.* North Equatorial Current) — Северное пассатное течение. Чёрные линии — уровенные разрезы на широтах 26 и 56° с. ш. (Малинин, Ангудович, 2024). Δ*h* — градиент уровня на концах локальных разрезов

Интенсивность циркуляции САКВ контролируется в основном атлантической меридиональной опрокидывающейся циркуляцией (АМОЦ), которая является частью глобального океанического конвейера Брокера. Считается, что именно АМОЦ играет важную роль в изменениях климата СА, утеплении западной Европы и «атлантификации» Арктики ((Chafik et al., 2019; Devilliers et al., 2025; McCarthy et al., 2015; Rhein et al., 2011) и др.). В связи с этим на широтном разрезе через весь океан на 26° начиная с 2004 г. выполняется мониторинг переноса объёма вод в рамках программы RAPID (*англ.* Rapid Climate Change Programme) с использованием температуры, солёности и скорости течений, полученных с буёв «Арго» (McCarthy et al., 2015).

Субполярный циклонический круговорот, охватывающий течения Северо-Атлантическое, Ирмингера, Восточно-Гренландское, Западно-Гренландское, Лабрадорское, простирается примерно от 45 до 65° с. ш. (Rhein et al., 2011) (см. *рис. 1*) и оказывает большое влияние на регулирование процессов взаимодействия тёплых вод СА с полярным регионом ((Asbjørnsen et al., 2020; Marzocchi et al., 2015) и др.). В его пределах, особенно в морях Лабрадор и Ирмингера, происходит интенсивная зимняя конвекция, формирующая североатлантическую глубинную водную массу — важнейший компонент глобальной термохалинной циркуляции Брокера (Башмачников и др., 2018; Крашенинникова, 2019; Федоров и др., 2018; Bailey et al., 2005; Centurioni, Gould, 2004; Dickson, Brown, 1994; Rhein et al., 2015). Механизм конвекции запускается в зимний период, когда сочетание нескольких факторов достигает критического уровня. Сильное выхолаживание поверхности океана арктическими воздушными массами приводит к увеличению плотности верхнего слоя воды. Одновременно

интенсивные ветра вызывают активное перемешивание поверхностного слоя. Всё это приводит к конвективному опусканию вод, которое может достигать глубин 1000–2000 м (Marshall, Schott, 1999; Våge et al., 2018). Особенностью глубокой конвекции в СЦКВ считается её значительная межгодовая изменчивость, тесно связанная с крупномасштабными атмосферными процессами.

Исследования последних десятилетий показали, что интенсивность конвекции существенно зависит от фаз Североатлантического колебания (САК) (Yashayaev, Loder, 2017). В положительную фазу САК усиление западных ветров приводит к более интенсивному выхолаживанию поверхности океана и, как следствие, к активизации конвективных процессов. Напротив, в отрицательную фазу САК ослабление ветрового воздействия и увеличение притока тёплых вод из САКВ могут существенно подавлять конвективную активность. Прекрасное комплексное описание гидрометеорологических процессов для положительной и отрицательной фазы САК даётся в работе (Нестеров, 2013). Североатлантическое колебание выступает ключевым регулятором интенсивности и положения полярного фронта, определяя перенос тепла и влаги между субтропиками и высокими широтами. Хотя до настоящего времени остаётся много вопросов касательно механизмов управляющих САК, оно выступает важнейшим индексом климатической системы в СА.

Взаимодействие между САКВ и СЦКВ наиболее ярко проявляется через систему пограничных течений, примерно между 45 и 55° с. ш., которые обеспечивают обмен теплом, солёностью и другими океанографическими характеристиками между субтропическими и субполярными широтами (Дворянинов и др., 2016). Основное связующее звено между САКВ и СЦКВ — Северо-Атлантическое течение. Это течение переносит тёплые и солёные воды из субтропиков в высокие широты, где они охлаждаются и включаются в субполярный круговорот. Этот процесс критически важен для климата Западной Европы и Арктики, так как он совместно с атмосферным форсингом смягчает температуру в этих регионах (Малинин, Ангудович, 2024).

В работе (Малинин, Ангудович, 2022) показано, что уровенный разрез на широте 26° достаточно надёжно контролирует не только систему циркуляции САКВ, но и межгодовую изменчивость уровня океана всей СА. Поскольку изменения уровня на этом разрезе тесным образом связаны с индексами САК и «северной стены» Гольфстрима GSNW (*англ.* Gulf Stream North Wall), то его можно считать реперным. Таким же реперным разрезом для СЦКВ становится широтный разрез через океан на 56° (Малинин, Ангудович, 2024), для которого выявлена высокая статистическая связь между изменениями уровня и температуры поверхности океана (ТПО) в морях Лабрадор, Ирмингера и в районе Гренландской котловины. В частности, при повышении уровня происходит ослабление глубокой конвекции в указанных в морях.

Важнейшей составляющей САКВ, как отмечено выше, представляется АМОЦ. В работах (Малинин, Ангудович, 2022, 2024) показано, что межгодовая изменчивость уровня на широтных разрезах 26 и 56° тесно связана с изменениями интенсивности АМОЦ и рециркуляции в субтропическом круговороте (Q_{UMO}). Это позволяет вычислять АМОЦ и Q_{UMO} косвенным путём по альтиметрическим значениям уровня, не прибегая к трудоёмкой процедуре определения гидрофизических параметров в толще океана. Исходя из этого, был предложен интегральный индекс североатлантической циркуляции (ИСЦ), рассчитываемый как разность среднего уровня на разрезах 26 и 56°. Данный индекс демонстрирует высокую корреляцию с ведущими климатическими индексами, в частности с САК ($r = 0{,}85$), и отражает совместную динамику САКВ и СЦКВ (Малинин, Ангудович, 2024).

Однако индекс ИСЦ, основанный на альтиметрических данных с 1993 г., характеризует лишь короткопериодные колебания климата. Очевидно, более длительные изменения климата в СА также должны быть связаны с изменениями уровня океана. Поэтому возникает необходимость нахождения такого индекса циркуляции по данным о морском уровне на стационарных береговых станциях, имеющих длительный период наблюдений, который был бы максимально связан с ИСЦ и отражал особенности изменения климата в СА. Данной цели и посвящена настоящая работа.

Исходные данные

Основой расчётов послужил обширный массив спутниковой информации и натурных гидрологических наблюдений. Для вычисления интегрального показателя ИСЦ, характеризующего циркуляцию в системе САКВ и СЦКВ, использовались модельные значения уровня, полученные из архива реанализа Copernicus Marine Service (https://doi.org/10.48670/moi-00021), продукт GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030 за период с 1993 по 2023 г. Данный продукт обеспечивает высокое пространственное разрешение (0,083×0,083°) и создан на основе ассимиляции и валидации измерений с нескольких спутниковых альтиметрических миссий, включая TOPEX/Poseidon (*англ.* Topography Experiment/Poseidon), Jason-1, Jason-2, Jason-3, Sentinel-3A/B, ERS-1/2 (*англ.* European Remote-Sensing Satellite), Envisat и др.

Для характеристики ледовых условий в Баренцевом море (БМ) (*рис. 2*) использовались данные о среднегодовой площади морского льда, полученные из архива Национального центра данных по снегу и льду NSIDC (*англ.* National Snow and Ice Data Center) (США) на основе спутниковых пассивных микроволновых измерений (продукт Sea Ice Index, Version 4 (https://nsidc.org/data/g02135/versions/4)). Мониторинг осуществлялся с использованием данных с радиометров SMMR (*англ.* Scanning Multichannel Microwave Radiometer) (Nimbus-7), SSM/I (*англ.* Special Sensor Microwave/Imager) и SSMIS (*англ.* Special Sensor Microwave Imager Sounder) (DMSP (*англ.* Defence Meteorological Satellite Program)). Ключевым преимуществом пассивного микроволнового зондирования является его всепогодность, что обеспечивает непрерывный мониторинг ледового покрова независимо от метеоусловий. Ввиду ограниченности спутниковой эры, данные доступны с 1979 г. по настоящее время.

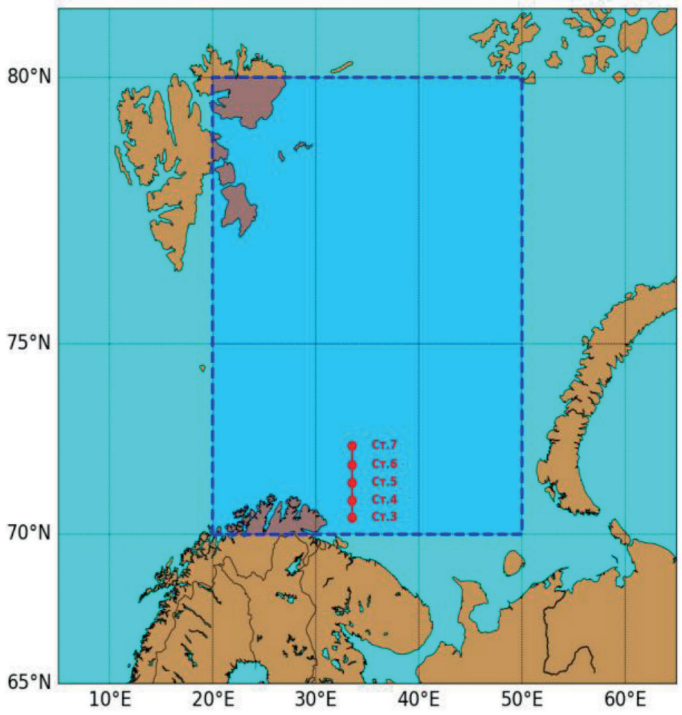


Рис. 2. Расположение района с данными температуры приземного воздуха, площади морского льда Баренцева моря (синие штриховые линии) и станций 3–7 океанографического разреза «Кольский меридиан» (красные маркеры)

Для анализа изменчивости температуры приземного воздуха над акваторией в БМ использовались данные глобального атмосферного реанализа пятого поколения ERA5, разработанного Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды ECMWF (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis Fifth Generation). Реанализ

ERA5 ассимилирует огромный объём исторических и спутниковых наблюдений с помощью метода 4D-Var, включая данные со спектрометров IASI (*англ.* Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) (MetOp, *англ.* Meteorological Operational), AIRS (*англ.* Atmospheric Infrared Sounder) (Aqua), радиометров AMSU (*англ.* Advanced Microwave Sounding Unit), а также спутниковой альтиметрии и GPS-радиозатменных измерений (*англ.* Global Positioning System), и представляет собой наиболее точное и полное описание состояния глобальной атмосферы (Hersbach et al., 2020). Данные ERA5 обладают высоким пространственно-временным разрешением: горизонтальное разрешение 0,25×0,25° (~31 км) с часовой дискретностью. В настоящей работе использовались среднегодовые значения температуры воздуха на высоте 2 м, полученные средневзвешенным усреднением относительно площадей «квадратов» для БМ в пределах 70–80° с. ш. и 20–50° в. д. за 1948–2023 гг. (см. *рис. 2*).

Для исследования долгопериодной изменчивости уровня океана в СА использовались временные ряды среднегодовых данных на береговых станциях, расположенных на восточном побережье Северной Америки. Эти данные за 1948–2023 гг., практически не имеющие пропусков, были получены из архива Постоянной службы среднего уровня моря PSMSL (*англ.* Permanent Service for Mean Sea Level) (www.psmsl.org), которая является признанным мировым центром по долгосрочным измерениям уровня моря и функционирует под эгидой Международной ассоциации геодезии IAG (*англ.* International Association of Geodesy) с 1933 г. К сожалению, данные по уровню береговых станций в Исландии и на Британских островах, хотя расположены ближе к ядру СЦКВ, однако имеют существенные пропуски в середине XX в., что делает их непригодными для статистического анализа совместно с американскими станциями.

Для оценки влияния циркуляционных процессов в СА на адвекцию тепла в Арктику использовались данные о средней температуре воды в слое 0–200 м на стандартном гидрологическом разрезе «Кольский меридиан», предоставленные Полярным филиалом Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ПИНРО им. Н. М. Книповича) (http://pinro.vniro.ru/). Разрез «Кольский меридиан» можно считать уникальным многолетним стандартным разрезом, пересекающим основную ветвь Мурманского течения — продолжения Норвежского и, соответственно, Северо-Атлантического течения, несущего тепло в БМ (Карсаков и др., 2022). Данные температуры на разрезе собираются в ходе регулярных экспедиционных работ с высокой пространственной и временной дискретностью, что позволяет получать достаточно надёжные характеристики термохалинного состояния вод. Для анализа использовались среднегодовые значения температуры воды в слое 0–200 м между станциями 3–7, осреднённые по всему разрезу, за период с 1951 по 2020 г.

В статье также применялся набор основных климатических индексов Северного полушария за 1948–2023 гг., полученный с портала PSL (*англ.* Physical Sciences Laboratory) Национального управления океанических и атмосферных исследований США NOAA (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration) (https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/):

- индекс САК является доминирующим режимом изменчивости атмосферной циркуляции в СА, определяющим силу и положение западного переноса;
- индекс Арктической осцилляции (АО) представляет собой первый режим анализа эмпирических ортогональных функций EOF (*англ.* Empirical Orthogonal Function) аномалий на уровне 1000 гПа от 20 до 90° с. ш. и отвечает за усиление зонального переноса в средних широтах на всём полушарии (Лемешко и др., 2021; Малинин, Вайновский, 2018; Thompson, Wallace, 1998; Wang et al., 2009);
- индекс GSNW количественно характеризует меридиональные смещения положения северной границы Гольфстрима, определяемые по градиенту температуры в зоне фронта;
- индекс температуры поверхности океана в тропической Северной Атлантике TNA (*англ.* Tropical Northern Atlantic) рассчитывается как среднее значение аномалий ТПО в регионе 5,5–23,5° с. ш., 15,0–57,5° з. д. и связан с изменчивостью пассатной циркуляции и интенсивностью Азорского антициклона;

- индекс Атлантической мультидекадной осцилляции (AMO) представляет собой низкочастотные (60–80 лет) колебания ТПО в СА (0–60° с. ш., 75–7,5° з. д.), оказывающие существенное влияние на климат сопредельных территорий;
- индекс Восточно-Атлантического/Западно-Российского паттерна (EA/WR) — ведущий режим низкочастотной изменчивости атмосферной циркуляции. Его положительная фаза, связанная с формированием антициклона над Западной Россией, вызывает отрицательные аномалии температуры воздуха в Арктическом секторе России (Barnston, Livesey, 1987; Lim, 2015).

Результаты расчётов и их обсуждение

Факторный анализ

Наиболее развитая сеть стационарных береговых станций расположена в Америке от северного побережья Мексиканского залива до южной части канадской провинции Онтарио (*рис. 3*). Было выделено 23 станции за 1948–2023 гг. (74 года). Уровень на южных станциях до мыса Хаттерас характеризует меридиональный перенос тепла на север Гольфстримом, который далее отходит от побережья в открытый океан. Северные станции находятся в основном в зоне влияния холодного Мэнского течения, образующегося из ответвления Лабрадорского течения, которое огибает Ньюфаундленд и движется на юг. Южнее залива Мэн оно вливается в холодное Восточно-Американское прибрежное течение.

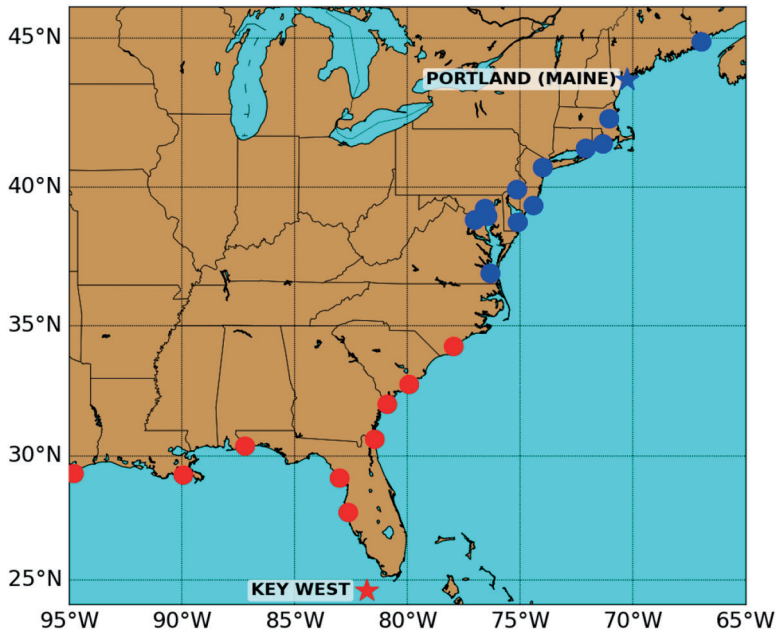


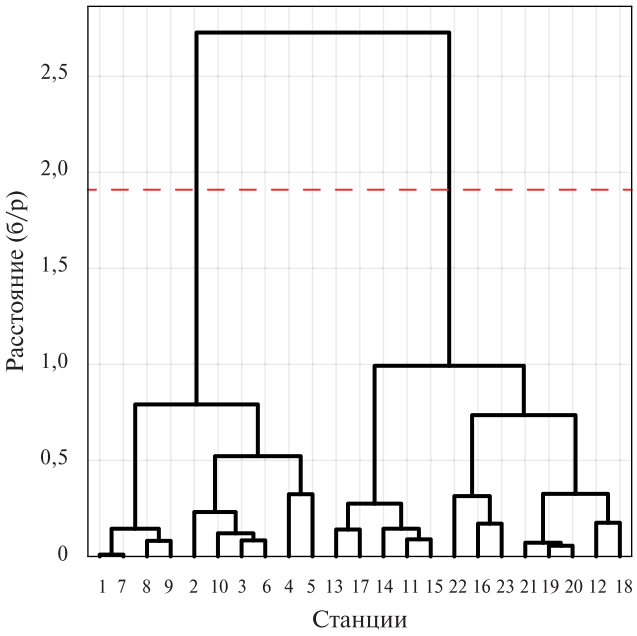
Рис. 3. Схема расположения уровенных станций на восточном побережье Америки. Красным цветом отмечены станции южной группы, синим — станции северной группы. Звёздочками выделены реперные станции US Coast Guard Sector Key West (Флорида) и US Coast Guard Station South Portland (Южный Портленд, залив Мэн)

Матрица среднегодовых значений морского уровня размером 23×74 была подвергнута разложению методом главных факторов. В результате второго вращения методом Кайзера получено, что первые три главных фактора описывают 79 % дисперсии, из них на первый приходится 56 %, на второй — 18 %. Нагрузки третьего фактора малы, поэтому они могут не учитываться. На *рис. 4а* приводится распределение факторных нагрузок первых трёх главных факторов. Видно, что максимальные нагрузки первого фактора описывают межгодовую

изменчивость уровня моря северных станций (11–23), в то время как для группы южных станций (1–10) факторные нагрузки малы. Для второго фактора имеем обратную картину. Это означает, что корреляция годовых значений уровня моря между северными и южными станциями должна быть незначимой.

Станции	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
1	0,18	**−0,88**	0,06
2	0,22	**−0,82**	−0,13
3	0,41	**−0,70**	−0,21
4	0,16	−0,39	−0,30
5	0,05	**−0,70**	−0,28
6	0,33	**−0,71**	−0,24
7	0,18	**−0,88**	0,07
8	0,25	**−0,94**	0,09
9	0,27	**−0,95**	0,01
10	0,35	**−0,80**	−0,20
11	**0,88**	−0,31	−0,12
12	**0,87**	−0,35	−0,02
13	**0,84**	−0,23	−0,38
14	**0,84**	−0,33	−0,26
15	**0,92**	−0,29	−0,19
16	0,42	−0,09	0,12
17	**0,81**	−0,18	−0,26
18	**0,92**	−0,18	−0,00
19	**0,89**	−0,20	0,16
20	**0,93**	−0,23	0,19
21	**0,91**	−0,17	0,21
22	**0,71**	−0,01	0,25
23	**0,56**	−0,16	0,20

а



б

Рис. 4. Распределение факторных нагрузок первых трёх главных факторов уровня моря на 23 станциях восточного побережья Америки, полужирным начертанием выделены факторные нагрузки, абсолютное значение которых больше 0,5 (*а*); дендрограмма факторных нагрузок методом Уорда (*б*)

Наиболее репрезентативные станции, наилучшим образом отражающие корреляцию с уровнем других станций, — это в южной группе станция Key West (24,5° с. ш., 81,8° з. д.), а в северной группе станция Portland (43,7° с. ш., 70,3° з. д.) (см. *рис. 3*). Сопоставление годовых значений уровня на этих станциях представлено на *рис. 5*. Нетрудно видеть наличие хорошо выраженных линейных трендов, обусловленных влиянием на них тренда уровня Мирового океана. После исключения линейных трендов коэффициент корреляции годовых значений уровня на станциях Key West и Portland оказался равным $r = 0{,}14$. Отсюда видно, что межгодовая изменчивость уровня на этих станциях не повторяет друг друга и, очевидно, определяется разными причинами. Так же из дендрограммы факторных нагрузок рассчитанной методом Уорда (см. *рис. 4б*) заметно, что есть чёткое разделение на два класса, в которых станции полностью соответствуют южной и северной группам точек.

Распределение уровенных станций на две группы имеет достаточно чёткое обоснование. Десять южных станций, формирующие второй кластер, связаны с САКВ, динамика которого в значительной степени зависит от Гольфстрима. Уровень на станции Key West имеет высокую корреляцию ($r = 0{,}89$) со средним уровнем на широтном разрезе 26° с. ш. между 80–70° з. д. и со средним уровнем на меридиональном разрезе по 80° з. д. между 25,5–23° с. ш. ($r = 0{,}94$), характеризующим Флоридское течение.

Современные исследования демонстрируют чёткую связь динамики морского уровня в южном регионе с интенсивностью вод Гольфстрима, которая может меняться в зависимости от доминирующего физического механизма. Можно полагать, что в климатическом

масштабе усиление меридионального переноса тепла на север, т. е. возрастание мощности течения Гольфстрим, сопровождается увеличением уровня в южных широтах СА и соответствующим уменьшением уровня в северных широтах. Модельные исследования (Marzocchi et al., 2015) показывают, что усиление меридионального переноса тепла в СА непосредственно связано с интенсивным потеплением субполярного круговорота в середине 1990-х гг. в результате адвекции тепла с юга на север.

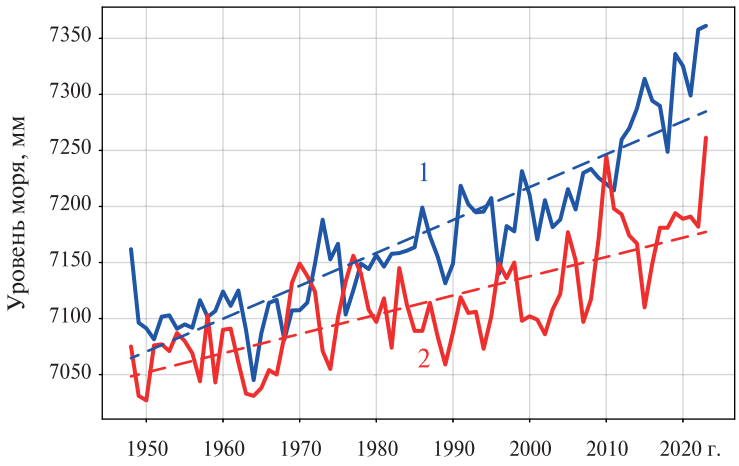


Рис. 5. Сопоставление среднегодовых значений колебаний уровня на станциях Key West (1) и Portland (2) с 1948 по 2023 г.

В работе (Ezer, 2019) продемонстрировано, что в многодекадном масштабе уровень у побережья Южно-Атлантической бухты, расположенной южнее мыса Хаттерас, в частности, на станции US Coast Guard Sector Charleston, имеет высокую положительную корреляцию ($r = 0{,}8...0{,}94$) с расходом Гольфстрима. В то же время на более коротких временных масштабах колебания уровня в южных широтах могут испытывать влияние локального воздействия и мезомасштабных вихрей, которые будут оказывать на уровень обратный эффект (Ezer, 2019). Так, в более ранней работе (Ezer, 2018) выявлено, что во время прохождения урагана Мэтью в 2016 г., несмотря на сокращение расхода Флоридского течения на ~30 % (около 10 Св), на побережье Южно-Атлантической бухты отмечался ветровой нагон, который вызвал подъём уровня на ~10 см.

Входящие в первый кластер северные станции находятся севернее разворота Гольфстрима в открытый океан, поэтому межгодовая изменчивость их уровня должна преимущественно отражать динамику СЦКВ, в значительной степени зависящего от холодного Лабрадорского течения. Его продолжение в виде вдольберегового холодного течения проникает в залив Мэн, влияя на гидрологию залива и колебания уровня на станции Portland. Отражением связи колебаний уровня на станции Portland с СЦКВ становится значимая корреляция ТПО в зоне глубокой конвекции Лабрадорского моря (Белоненко, Федоров, 2018) за 1993–2023 гг., равная $r = 0{,}47$, а также со средним уровнем на широтном разрезе 56° между 57–38° з. д., показывающим интенсивность Лабрадорского течения ($r = 0{,}42$). Естественно, определённое влияние на режим уровня в заливе Мэн и в Срединно-Атлантической бухте, находящейся южнее, оказывают локальные факторы, обусловленные процессами взаимодействия атмосферы с океаном и атмосферной циркуляцией (Chisholm et al., 2021; Ezer, 2019; Mountain, 2012).

Принимая во внимание большое значение межгодовых колебаний уровня на станциях Key West и Portland для крупномасштабной циркуляции океана можно предположить, что градиент уровня этих станций ΔKW-P (*англ.* Key West – Portland) будет служить репрезентативным индикатором взаимодействия двух ключевых круговоротов (САКВ и СЦКВ) в климатической системе Северной Атлантики.

Связь градиента уровня между станциями Key West – Portland (ΔKW-P) с климатическими индексами Северной Атлантики

Прежде всего, была рассчитана корреляция для сглаженных по трёхлетиям значений ΔKW-P с интегральным ИСЦ для среднегодовых ($r = 0{,}74$), зимних ($r = 0{,}74$) и летних ($r = 0{,}57$) условий за 1993–2023 гг.

На *рис. 6* представлено сопоставление сглаженных по трёхлетиям среднегодовых значений градиента уровня ΔKW-P с 1948 по 2023 г. и интегрального ИСЦ с 1993 по 2023 г. Нетрудно видеть, что оба индекса имеют близкий межгодовой ход, характеризующийся локальным отрицательным трендом с 1993 по 2010 г. и сильным положительным трендом с 2010 по 2023 г., оценки которых даются в *табл. 1*.

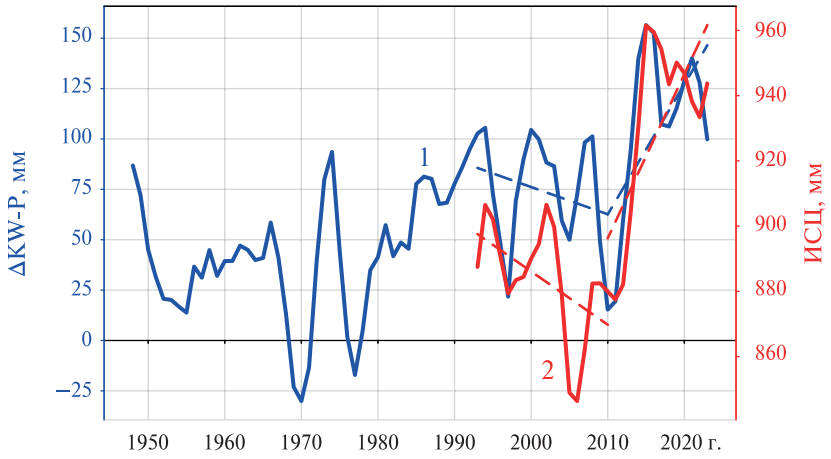


Рис. 6. График сглаженных за три года среднегодовых стандартизированных значений градиента уровня ΔKW-P с 1948 по 2023 г. (1) и интегрального ИСЦ с 1993 по 2023 г. (2)

Таблица 1. Оценки трендов индексов ΔKW-P и ИСЦ по фактическим среднегодовым данным о морском уровне за различные периоды

Индекс	1970–2015 гг.	1993–2010 гг.	2010–2023 гг.
ΔKW-P, мм/год	1,44	–1,30	6,66
ИСЦ, мм/год	–	–1,63	5,03

Высокая степень согласованности между индексами, особенно в зимний сезон ($r = 0{,}74$), когда атмосферно-океаническое взаимодействие в СА наиболее интенсивно, указывает на то, что градиент уровня ΔKW-P между двумя реперными береговыми станциями адекватно отражает сложные процессы, которые характеризуют ИСЦ.

Из *табл. 1*, в которой приводятся результаты расчёта трендов ΔKW-P и ИСЦ в абсолютных величинах, видно, что оценки трендов близки друг к другу. При этом интенсивный рост обоих показателей с 2010 г. у ΔKW-P даже выше, чем у ИСЦ, что свидетельствует о высокой чувствительности прибрежной системы к изменчивости циркуляции вод в СА.

Сравнительный анализ корреляции ΔKW-P с основными климатическими индексами за два периода — эпоху спутниковых измерений (1993–2023) и более длительный период инструментальных наблюдений (1948–2023) — выявил устойчивые значимые связи (*табл. 2*). Наибольшие коэффициенты корреляции наблюдаются с индексом АО: $r = 0{,}81$ для среднегодовых значений и $r = 0{,}70$ для зимних за 1993–2023 гг. Тесная связь подчёркивает ключевую роль зональной атмосферной циркуляции, регулируемой АО, в формировании положительного градиента уровня ΔKW-P. Высокая положительная корреляция с индексом GSNW ($r = 0{,}62...0{,}67$ для среднегодовых значений) указывает на то, что смещение положения

Гольфстрима на север представляется важным физическим механизмом, определяющим рост градиента уровня ΔKW-P, который зависит главным образом от повышения уровня на станции Key West. Вследствие более высокой изменчивости уровня его корреляция на этой станции с градиентом ΔKW-P составляет $r = 0{,}75$, в то время как корреляция ΔKW-P с уровнем на станции Portland равна $r = 0{,}26$.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между трёхлетними скользящими средними индекса ΔKW-P и климатическими индексами Северной Атлантики за 1993–2023 гг. и за 1948–2023 гг. для различных сезонов и в целом за год. Полужирным начертанием выделены значимые коэффициенты корреляции

Индекс	ΔKW-P$_{год}$		ΔKW-P$_{зима}$		ΔKW-P$_{лето}$	
	1993–2023 гг.	1948–2023 гг.	1993–2023 гг.	1948–2023 гг.	1993–2023 гг.	1948–2023 гг.
CAK	**0,60**	**0,48**	**0,87**	**0,77**	0,16	**–0,27**
GSNW	**0,62**	**0,67**	**0,48**	**0,47**	**0,62**	**0,66**
EA/WR	–0,21	**–0,32**	0,03	0,17	–0,15	**–0,42**
AO	**0,81**	**0,64**	**0,70**	**0,58**	**0,32**	0,16
TNA	–0,24	0,21	–0,30	–0,06	**–0,40**	**0,32**
AMO	0,07	**0,30**	0,15	0,06	–0,15	**0,43**

Связь ΔKW-P с CAK носит ярко выраженный сезонный характер. Для зимнего сезона корреляция исключительно высока и устойчива: $r = 0{,}87$ за 1993–2023 гг. и $r = 0{,}77$ за 1948–2023 гг. Это связано с тем, что CAK наиболее активен именно в зимний период. Однако для летнего сезона связь статистически незначима или слабо отрицательна. Сравнение корреляций индексов ΔKW-P и ИСЦ показывает, что оба индекса имеют сходную структуру связей с климатическими индексами, демонстрируя наибольшее соответствие с CAK и AO. Кроме того, между ΔKW-P и GSNW отмечается устойчивая связь в течение всего года. Итак, при повышении ΔKW-P происходит усиление Гольфстрима с Северо-Атлантическим течением и циклонического переноса тёплых воздушных масс над системой Гольфстрим (Малинин, 2012) из СА в Западную Арктику, что способствует повышению температуры воздуха и уменьшению ледовитости, прежде всего в БМ. Отметим, что коэффициент корреляции между индексом AO и приземной температурой воздуха в БМ составил $r = 0{,}53$. Можно полагать, что повышение давления в южных широтах, и соответствующее его понижение в Арктике во время положительной фазы AO, способствует переносу тёплых воздушных масс из Норвежского моря на север в Арктику.

Таким образом, проведённый анализ подтверждает, что градиент уровня моря ΔKW-P, рассчитанный по данным долговременных береговых наблюдений, является репрезентативным индикатором системы круговоротов СА. Его синхронная изменчивость с интегральным ИСЦ, а также идентичный характер корреляций с ведущими климатическими индексами, особенно в зимний сезон, позволяют использовать этот параметр для дальнейшего анализа на временных масштабах, выходящих за пределы спутниковой эры.

Связь градиента уровня ΔKW-P с климатическими параметрами Баренцева моря

С учётом высокой статистической связи градиента уровня ΔKW-P с AO, CAK и GSNW можно полагать, что он может быть значимым предиктором изменчивости климата Западной Арктики. Для проверки данного предположения использовались три временных ряда:

- среднегодовые значения температуры воздуха, осреднённые для БМ в пределах 70–80° с. ш. и 20–50° в. д. за 1948–2023 гг., $T_{БМ}$;
- среднегодовые значения площади морского льда в БМ $S_{БМIce}$ за 1979–2023 гг.;

- средняя годовая температура воды в слое 0–200 м на стандартном гидрологическом разрезе Кольский меридиан (станции 3—7) $SST_{КМ}$ (*англ.* sea surface temperature) за 1951–2020 гг.

Вначале была найдена корреляция ΔKW-P с указанными выше характеристиками, которая для $T_{БМ}$ составила $r = 0{,}66$ (1950–2023), для $S_{БМ\,Ice}$ $r = -0{,}52$ (1979–2023), для $SST_{КМ}$ $r = 0{,}61$ (1951–2020), т. е. она физически правильно отражает характер связи между ними. Действительно, с ростом ΔKW-P температура воздуха в БМ и ТПО на Кольском меридиане повышается, а площадь морского льда в БМ уменьшается. Далее был выполнен расчёт статистических моделей указанных выше характеристик с набором из шести климатических индексов СА: ΔKW-P, AO (*англ.* Arctic Oscillation), САК, AMO (Атлантическая междесятилетняя осцилляция), TNA (*англ.* Tropical North Atlantic), EA/WR (*англ.* East Atlantic–West Russian) — для оценки роли ΔKW-P в этих моделях. Вычисления осуществлялись с помощью пошагового множественного линейного регрессионного анализа (МЛР) методом включения переменных. Данный метод позволяет объективно определить иерархию значимости предикторов, минимизировать проблему мультиколлинеарности предикторов и оценить их причинно-следственные связи с функцией отклика (Малинин, 2008). Выбор оптимальной модели выполняется посредством анализа четырёх основных параметров: R^2 (коэффициент детерминации), среднеквадратической ошибки (СКО) модели, критериев Фишера и Стьюдента. Ошибка модели бралась в долях СКО, значимость переменных определялась по величине параметра *p-level*, причём учитывалась только максимальная оценка $p\text{-}level_{max}$ какой-либо переменной, входящей в модель. В качестве критического значения *p-level* считалась величина 0,10 статистики Стьюдента.

В *табл. 3* приводятся результаты пошаговой регрессии температуры воздуха БМ $T_{БМ}$ с климатическими индексами СА. При этом итоговое уравнение регрессии имеет вид:

$$T_{БМ} = 0{,}01\Delta\text{KW-P} - 2{,}00(\text{EA/WR}) + 1{,}54\,\text{AO} + 1{,}49\,\text{TNA} - 4{,}00 + \varepsilon, \qquad (1)$$

где ε — случайная ошибка (остаток).

Таблица 3. Статистические оценки параметров пошаговой модели МЛР методом включения переменных температуры приземного воздуха в Баренцевом море в зависимости от климатических индексов Северной Атлантики за 1950–2023 гг.

Шаг	Включённый параметр	R^2	Стандартная ошибка в долях СКО	*F*-критерий	$p\text{-}level_{max}$	*r*
1	ΔKW-P	0,437	1,21	55,1	0	0,660
2	EA/WR	0,661	0,94	68,2	0	–0,650
3	AO	0,680	0,92	48,9	0,0464	0,531
4	TNA	0,714	0,88	42,4	0,0060	0,468
5	AMO	0,716	0,88	33,8	0,5013	0,466

В качестве оптимальной можно принять модель на четвёртом шаге ($R^2 = 0{,}714$). На первом шаге в модель был включён индекс ΔKW-P ($R^2 = 0{,}437$), что объясняется его важной ролью в регулировании переноса тепла океаном и адвекции воздушных масс над тёплым Норвежским течением в Европейский сектор Арктики. Включение на втором шаге индекса EA/WR позволило существенно увеличить коэффициент детерминации до 0,661. На последующих шагах вклад AO и TNA в дисперсию $T_{БМ}$ резко сокращается, но переменные остаются значимыми по критерию Стьюдента. В последнем столбце *табл. 3* представлены коэффициенты парной корреляции температуры воздуха с климатическими индексами. Их величина плавно уменьшается для каждого нового включённого в модель предиктора. Это подтверждает иерархию вхождения предикторов в модель (1) с точки зрения их вклада в описание дисперсии функции отклика $T_{БМ}$.

Из *табл. 3* видно, что индекс EA/WR имеет отрицательный коэффициент корреляции с температурой воздуха в БМ ($r = -0{,}65$). Во время отрицательной фазы EA/WR формируется аномалия циклонической циркуляции над Северо-Восточной Атлантикой и Скандинавией (Lim, 2015). На восточной периферии этого циклона устанавливаются устойчивые южные и юго-западные ветра, которые осуществляют адвекцию тёплых воздушных масс с субтропических широт Атлантики и Европейского континента в высокие широты, включая регион БМ.

Обратимся теперь к *табл. 4*, в которой представлены результаты пошаговой регрессии температуры воды на станциях 3–7 разреза «Кольский меридиан» с комплексом климатических параметров СА. На первом шаге в модель входит ΔKW-P, который описывает 37 % дисперсии ряда SST_{KM}. В качестве оптимальной можно принять модель на третьем шаге ($R^2 = 0{,}66$), так как на четвёртом шаге вклад EA/WR в дисперсию ряда SST_{KM} равен всего 0,02. Отметим, что все три переменные в формулу (2) входят с положительными знаками, что полностью отвечает физической сущности их связей с SST_{KM}. Итоговое уравнение регрессии имеет вид:

$$SST_{KM} = 0{,}2 \cdot 10^{-3} \Delta KW\text{-}P + 1{,}14AMO + 1{,}04AO - 0{,}40(EA/WR) - 0{,}50CAK + 4{,}12 + \varepsilon. \quad (2)$$

Таблица 4. Статистические оценки параметров пошаговой модели МЛР методом включения переменных средней температуры воды основной ветви Мурманского течения на разрезе «Кольский меридиан» (станции 3–7) в слое 0–200 м в зависимости от климатических индексов Северной Атлантики за 1951–2020 гг.

Шаг	Включённый параметр	R^2	Стандартная ошибка в долях СКО	*F*-критерий	$p\text{-}level_{max}$	*r*
1	ΔKW-P	0,373	0,80	42,3	0	0,611
2	AMO	0,565	0,68	45,4	0	0,563
3	AO	0,660	0,60	44,6	0,115	0,506
4	EA/WR	0,684	0,59	36,9	0,092	–0,558
5	CAK	0,704	0,56	31,8	0,040	0,243

Основным следствием усиления адвекции тепла в Арктику становится сокращение площади морского льда. Как было указано выше, между индексом ΔKW-P и площадью ледяного покрова в БМ отмечается отрицательная корреляция ($r = -0{,}52$). Из результатов пошаговой регрессии (*табл. 5*) видно, что на первых двух шагах в модель входят с отрицательными знаками AMO и ΔKW-P, вклад которых в дисперсию $S_{БМ\,Ice}$ составляет 48 и 11 % соответственно, т. е. с физической точки зрения влияние AMO и ΔKW-P на изменчивость площади морского льда очевидно. Оптимальное уравнение регрессии можно представить как:

$$S_{БМ\,Ice} = -2{,}59 \cdot 10^5 AMO - 1{,}17 \cdot 10^3 \Delta KW\text{-}P + 1{,}35 \cdot 10^5 (EA/WR) + 4{,}22 \cdot 10^5 + \varepsilon.$$

Таблица 5. Статистические оценки параметров пошаговой модели МЛР методом включения переменных площади морского льда в Баренцевом море в зависимости от климатических индексов Северной Атлантики за 1979—2023 гг.

Шаг	Включённый параметр	R^2	Стандартная ошибка в долях СКО	*F*-критерий	$p\text{-}level_{max}$	*r*
1	AMO	0,478	0,74	39,4	0	–0,673
2	ΔKW-P	0,586	0,67	29,7	0,002	–0,518
3	EA/WR	0,624	0,64	22,7	0,049	0,568
4	AO	0,646	0,63	18,2	0,127	–0,291

Итак, несмотря на формальный подход метода пошаговой регрессии к подбору переменных, который, начиная со второго шага, выбирает следующую переменную по наибольшему приращению коэффициента детерминации, можно отметить, что все три модели с физической точки зрения соответствуют характеру связей главных переменных, входящих в модель, с функцией отклика. Это важнейшее условие работоспособности моделей, так как они достоверно описывают изменчивость определяемых характеристик.

В *табл. 6* представлены оценки вкладов отдельных предикторов в описание дисперсии трёх климатических характеристик БМ. Из полученных результатов следует, что индекс ΔKW-P выступает ведущим предиктором для температуры воздуха (объясняет 43,7 % дисперсии) и температуры воды (37,3 %), в то время как в описание изменчивости площади морского льда наибольший вклад вносит индекс AMO (47,8 %).

Таблица 6. Оценки вкладов отдельных предикторов в описание дисперсии трёх климатических характеристик Баренцева моря

Индекс	$T_{БМ}$, модель 1	$SST_{КМ}$, модель 2	$S_{БМ Ice}$, модель 3
ΔKW-P	43,7	37,3	10,8
AMO	–	19,2	47,8
EA/WR	22,4	2,4	3,8

Таким образом, проведённый пошаговый регрессионный анализ убедительно доказал, что предложенный индекс ΔKW-P, рассчитанный по данным береговых наблюдений за уровнем моря на станциях Key West и Portland, можно считать не только надёжным индикатором интенсивности циркуляции вод в Северной Атлантике, но и практически ключевым предиктором изменчивости климата в БМ. Этот подход становится ценным дополнением к фундаментальным модельным исследованиям динамики субполярного круговорота, выполненным в работе (Marzocchi et al., 2015), в которой на основе модельных расчётов показано, что мощность СЦКВ и АМОЦ в середине 1990-х гг. отражала выраженную тенденцию к ослаблению вплоть до 2005 г. Это совпадает с периодом потепления в данном регионе более чем на 1 °C. Предложенный в настоящей работе индекс ΔKW-P, будучи интегральным индикатором состояния системы САКВ – СЦКВ, согласуется с этими выводами, фиксируя отрицательную фазу его колебаний вплоть до 2010 г. (см. *рис. 6*). Отметим, что отрицательный тренд в ΔKW-P и ИСЦ является индикатором падения мощности АМОЦ (Малинин, Ангудович, 2022). Можно полагать, что это привело к уменьшению меридионального переноса тёплых вод в высокие широты в данный период.

Заключение

Выполнен анализ многолетних данных береговых наблюдений за уровнем моря на 23 станциях за 1948–2023 гг. вдоль восточного побережья Северной Америки. На основе факторного анализа и иерархического кластерного анализа методом Уорда показано, что среднегодовые данные по уровню на станциях Key West и Portland наилучшим образом характеризуют дисперсию уровня 23 станций, причём градиент уровня этих станций ΔKW-P является репрезентативным индикатором взаимодействия двух ключевых круговоротов САКВ и СЦКВ в климатической системе Северной Атлантики.

Установлено, что индекс ΔKW-P демонстрирует высокую степень согласованности с интегральным ИСЦ, ранее рассчитанным по альтиметрическим данным. Для сглаженных по трёхлетиям значений корреляция за 1993–2023 гг. между ΔKW-P и ИСЦ составила $r = 0{,}74$ для среднегодовых значений. Также выявлены устойчивые статистически значимые связи индекса ΔKW-P с ведущими климатическими индексами СА. Наибольшие коэффициенты корреляции наблюдаются с индексом Арктической осцилляции (АО): $r = 0{,}81$ за 1993–

2023 гг. для среднегодовых значений и $r = 0{,}64$ за 1948–2023 гг. Связь с Североатлантическим колебанием носит ярко выраженный сезонный характер: для зимнего сезона корреляция исключительно высока и устойчива ($r = 0{,}87$ за 1993–2023 гг. и $r = 0{,}77$ за 1948–2023 гг.), тогда как для летнего сезона связь статистически незначима. Кроме того, отмечается высокая положительная корреляция ΔKW-P с индексом GSNW ($r = 0{,}62...0{,}67$ для среднегодовых значений), которая свидетельствует о том, что градиент ΔKW-P физически правильно отражает интенсивность переноса тепла Гольфстримом на север.

Показано, что предложенный индекс ΔKW-P представляется ключевым предиктором изменчивости климатических параметров в Баренцевом море. Корреляция ΔKW-P с приземной температурой воздуха в БМ для $T_{БМ}$ составила $r = 0{,}66$, с температурой воды на разрезе «Кольский меридиан» $r = 0{,}61$, с площадью морского льда в БМ $r = -0{,}52$, т. е. она физически правильно отражает характер связи между ними. С помощью пошагового регрессионного анализа выявлено, что индекс ΔKW-P с большим преимуществом опережает вклады других индексов СА (AO, CAK, AMO, TNA, EA/WR) в дисперсию климатических параметров БМ. Так, вклад ΔKW-P в температуру воздуха составляет 44 %, в температуру воды на Кольском меридиане — 37 %, в площадь ледового покрова моря — около 11 %.

Понятно, прямого влияния индекса ΔKW-P на климатический режим БМ нет. Очевидно, его можно рассматривать как репрезентативный индикатор изменений климата в БМ. Его возможное влияние на БМ видится опосредованным во взаимосвязи с другими индексами. При положительной фазе CAK, ОА и росте GSNW происходит усиление интенсивности круговоротов САКВ, СЦКВ и повышение расхода Гольфстрима (Дворянинов и др., 2016; Малинин, 2012; Нестеров, 2013). Это способствует росту ИСЦ и формированию положительного градиента уровня между станциями Key West и Portland. Усиление Гольфстрима означает увеличение поступления тёплых вод с Северо-Атлантическим течением в Норвежское море и далее в Арктику. Это подтверждает значимая положительная корреляция расхода Северо-Атлантического течения через Фареро-Шетландский полив (Mayer et al., 2023) с индексами GSNW ($r = 0{,}66$) и ΔKW-P ($r = 0{,}65$). Немного меньше корреляция с индексом АО ($r = 0{,}53$).

Отметим, если влияние CAK на климат ограничено умеренными широтами, то влияние АО распространяется на высокие и арктические широты. При положительной фазе отмечается пониженное давление в Арктике и более высокое в умеренных широтах. Пониженному давлению в Арктике соответствует интенсивный циркумполярный вихрь, способствующий усилению зональной циркуляции в тропосфере, при которой отмечаются положительные аномалии температуры воздуха в высоких широтах (Малинин, Вайновский, 2018). Однако зональный перенос не означает строго широтного движения. В Норвежском море значительным орографическим препятствием зональному переносу служат Скандинавские горы, причём высота некоторых из них превышает 2000 м. Поэтому в переносе будет присутствовать северо-восточная составляющая, вследствие чего сравнительно тёплый воздух циклонического происхождения начнёт поступать в БМ. Определённую роль в росте температуры воздуха в БМ играет также индекс EA/WR, отрицательная фаза которого способствует притоку тёплых воздушных масс в БМ за счёт усиления циклонической циркуляции над Северо-Восточной Атлантикой.

Итак, индекс ΔKW-P можно рассматривать как показатель крупномасштабной изменчивости характеристик климата БМ. Очевидно, изложенная выше аргументация является приближённой и требует дальнейшего уточнения. Однако важно, что использование индекса ΔKW-P, основанного на многолетних рядах береговых наблюдений за уровнем моря, открывает новые возможности для исследования долгопериодных изменений климата и циркуляции вод не только в Северной Атлантике, но и в сопредельных регионах Арктического бассейна.

Работа выполнена при поддержке государственного задания Минобрнауки РФ № FSZU-2026-0003.

Авторы выражают особую благодарность уважаемому рецензенту за высочайший уровень экспертизы, дотошность и методическую строгость, которые позволили устранить замечания и помогли уточнить ключевые положения исследования.

Литература

1. *Башмачников И. Л.*, *Федоров А. М.*, *Весман А. В. и др.* Термохалинная конвекция в субполярных морях Северной Атлантики и Северо-Европейского бассейна СЛО по спутниковым и натурным данным. Часть 1: локализация областей конвекции // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 184–194. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-184-194.
2. *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.
3. *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.
4. *Карлин Л. Н.*, *Малинин В. Н.*, *Гордеева С. М.* Изменчивость гидрофизических характеристик в Гольфстриме // Океанология. 2013. Т. 53. № 4. С. 454–462. DOI: 10.7868/S0030157413040047.
5. *Карсаков А. Л.*, *Трофимов А. Г.*, *Анциферов М. Ю. и др.* 120 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан». Мурманск: ПИНРО им. Н. М. Книповича, 2022. 145 с.
6. *Крашенинникова С. Б.* Водные массы и переносы тепла в Северной Атлантике. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2019. 124 с.
7. *Лемешко Е. Е.*, *Лемешко Е. М.*, *Новицкая В. П.* Влияние арктической осцилляции на формирование режимов циркуляции вод в секторе Северного, Норвежского и Баренцева морей // Эколог. безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 2. С. 47–64. DOI: 10.22449/2413-5577-2021-2-47-64.
8. *Малинин В. Н.* Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: Изд. РГГМУ, 2008. 408 с.
9. *Малинин В. Н.* Гольфстрим и климат Европы // Общество. Среда. Развитие. 2012. № 1. С. 214–220.
10. *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.
11. *Малинин В. Н.*, *Ангудович Я. И.* Уровень океана как показатель межгодовой изменчивости циркуляции вод и климата в Северной Атлантике // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 335–353. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-335-353.
12. *Малинин В. Н.*, *Вайновский П. А.* О причинах первого потепления Арктики в XX столетии // Ученые записки Российского гос. гидрометеоролог. ун-та. 2018. № 53. С. 34–55.
13. *Нестеров Е. С.* Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: Триада, 2013. 144 с.
14. *Федоров А. М.*, *Башмачников И. Л.*, *Белоненко Т. В.* Локализация областей глубокой конвекции в морях Северо-Европейского бассейна, Лабрадор и Ирмингера // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Науки о Земле. 2018. Т. 63. № 3. С. 345–362. DOI: 10.21638/spbu07.2018.306.
15. *Asbjørnsen H.*, *Årthun M.*, *Skagseth Ø.*, *Eldevik T.* Mechanisms underlying recent Arctic Atlantification // Geophysical Research Letters. 2020. V. 47. Article e2020GL088036. DOI: 10.1029/2020GL088036.
16. *Bailey D. A.*, *Rhines P. B.*, *Häkkinen 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. No. 5. P. 497–516. DOI: 10.1007/s00382-005-0050-3.
17. *Barnston A. G.*, *Livesey R. E.* Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // Monthly Weather Review. 1987. V. 115. No. 6. P. 1083–1126. DOI: 10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2.
18. *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. DOI: 10.1357/0022240041446209.
19. *Chafik L.*, *Nilsen J. E. Ø.*, *Dangendorf S. et al.* North Atlantic Ocean Circulation and decadal sea level change during the altimetry era // Scientific Reports. 2019. V. 9. Article 1041. DOI: 10.1038/s41598-018-37603-6.
20. *Chisholm L.*, *Talbot T.*, *Appleby W. et al.* Projected changes to air temperature, sea-level rise, and storms for the Gulf of Maine region in 2050 // Elementa: Science of the Anthropocene. 2021. V. 9. No. 1. Article 00059. 14 p., DOI: 10.1525/elementa.2021.00059.
21. *Devilliers M.*, *Olsen S. M.*, *Langehaug H. R. et al.* Constraining CMIP6 simulations for Atlantic Water in the Arctic using an AMOC-SST index // Frontiers in Climate. 2025. V. 7. Article 1550772. 14 p. DOI: 10.3389/fclim.2025.1550772.
22. *Dickson R.*, *Brown J.* The production of North Atlantic Deep Water: Sources, rates, and pathways // J. Geophysical Research: Oceans. 1994. V. 99. No. C6. P. 12319–12341. DOI: 10.1029/94JC00530.

23. *Ezer T.* On the interaction between a hurricane, the Gulf Stream and coastal sea level // Ocean Dynamics. 2018. V. 68. P. 1259–1272. DOI: 10.1007/s10236-018-1193-1.
24. *Ezer T.* Regional differences in sea level rise between the Mid-Atlantic Bight and the South Atlantic Bight: Is the Gulf Stream to blame? // Earth's Future. 2019. V. 7. No. 7. P. 771–783. DOI: 10.1029/2019EF001174.
25. *Hersbach H.*, *Bell B.*, *Berrisford P. et al.* The ERA5 global reanalysis // Quarterly J. Royal Meteorological Soc. 2020. V. 146. No. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
26. *Lim Y.-K.* The East Atlantic/West Russia (EA/WR) teleconnection in the North Atlantic: climate impact and relation to Rossby wave propagation // Climate Dynamics. 2015. V. 44. No. 11–12. P. 3211–3221. DOI: 10.1007/s00382-014-2381-4.
27. *Marshall J.*, *Schott F.* Open-ocean convection: Observations, theory, and models // Reviews of Geophysics. 1999. V. 37. No. 1. P. 1–64. DOI: 10.1029/98RG02739.
28. *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. 2015. V. 142. P. 126–143. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2014.10.007.
29. *Mayer M.*, *Tsubouchi T.*, *Winkelbauer S. et al.* Recent variations in oceanic transports across the Greenland-Scotland Ridge // State of the Planet. 2023. V. 1-osr7. Article 14. 13 p. DOI: 10.5194/sp-1-osr7-14-2023.
30. *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.
31. *Mountain D. G.* Labrador slope water entering the Gulf of Maine — response to the North Atlantic Oscillation // Continental Shelf Research. 2012. V. 47. P. 150–155. DOI: 10.1016/j.csr.2012.07.008.
32. *Repschläger J.*, *Garbe-Schönberg D.*, *Weinelt M. et al.* Holocene evolution of the North Atlantic subsurface transport // Climate of the Past. 2017. V. 13. P. 333–344. DOI: 10.5194/cp-13-333-2017.
33. *Rhein M.*, *Kieke D.*, *Hüttl-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. DOI: 10.1016/j.dsr2.2010.10.061.
34. *Rhein M.*, *Kieke D.*, *Steinfeldt R.* Advection of North Atlantic Deep Water from the Labrador Sea to the southern hemisphere // J. Geophysical Research: Oceans. 2015. V. 120. No. 4. P. 2471–2487. DOI: 10.1002/2014JC010605.
35. *Stramma L.*, *Siedler G.* Seasonal changes in the North Atlantic subtropical gyre // J. Geophysical Research: Oceans. 1988. V. 93. No. C7. P. 8111–8118. DOI: 10.1029/JC093iC07p08111.
36. *Thompson D. W. J.*, *Wallace J. M.* The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields // Geophysical Research Letters. 1998. V. 25. No. 9. P. 1297–1300. DOI: 10.1029/98GL00950.
37. *Våge K.*, *Papritz L.*, *Håvik L. et al.* Ocean convection linked to the recent ice edge retreat along east Greenland // Nature Communications. 2018. V. 9. Article 1287. DOI: 10.1038/s41467-018-03468-6.
38. *Wang J.*, *Zhang J.*, *Watanabe E. et al.* Is the Dipole Anomaly a major driver to record lows in Arctic summer sea ice extent? // Geophysical Research Letters. 2009. V. 36. No. 5. Article L05706. 5 p. DOI: 10.1029/2008GL036706.
39. *Yashayaev I.*, *Loder J. W.* Further intensification of deep convection in the Labrador Sea in 2016 // Geophysical Research Letters. 2017. V. 44. No. 3. P. 1429–1438. DOI: 10.1002/2016GL071668.

Interannual variability of ocean levels in the North Atlantic and its impact on climate characteristics in the Barents Sea

Ya. I. Angudovich, V. N. Malinin

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

Building upon the authors' previous research and based on a comprehensive analysis of long-term satellite data (altimetry, passive microwave remote sensing, atmospheric reanalysis) and *in situ* observations, this study investigates the relationship between the interannual variability of sea level in the North Atlantic and climate characteristics in the region and the Western Arctic. A new integral circulation index (ΔKW-P) is proposed, representing the sea level gradient between continuous long-term records from the tide gauge stations in Key West (Florida) and Portland (Gulf of Maine). It is

shown that the ΔKW-P index effectively captures the dynamics of the interaction between the subtropical (STG) and subpolar (SPG) gyral systems. The ΔKW-P index exhibits a high correlation (correlation coefficient $r = 0.74$ for annual means) with the integral index of North Atlantic circulation, previously calculated from satellite altimetry data, confirming its representativeness. Robust and statistically significant linkages are identified between ΔKW-P and major climate indices, including the Arctic Oscillation (AO) ($r = 0.81...0.64$), the North Atlantic Oscillation (NAO) ($r = 0.87...0.77$ for winter), and the Gulf Stream North Wall (GSNW) index ($r = 0.62...0.67$). Using stepwise multiple regression analysis, it is proven that ΔKW-P is a key predictor of climatic parameters in the Barents Sea, contributing significantly to explaining the variance of near-surface air temperature (43.7 %), Murmansk Current water temperature (37.3 %), and sea ice area (~11 %). The results underscore that long-term coastal sea level records contain valuable information on the dynamics of the North Atlantic climate system. The proposed ΔKW-P index, based on data covering the period from 1948 to 2023, provides a robust tool for analyzing long-term climate and circulation changes, offering crucial insights into the processes of "Atlantification" in the Arctic.

Keywords: North Atlantic, satellite data, sea level, water circulation, Barents Sea, climate indices

Accepted: 16.02.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-9-26

References

1. Bashmachnikov I. L., Fedorov A. M., Vesman A. V. et al., Thermohaline convection in the subpolar seas of the North Atlantic from satellite and in situ observations. Part 1: Localization of the deep convection sites, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 7, pp. 184–194 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-184-194.
2. Belonenko T. V., Fedorov A. M., Steric level fluctuations and deep convection in the Labrador and Irminger Seas, *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, No. 3, pp. 56–69 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961418030041.
3. Dvoryaninov G. S., Kubryakov A. A., Sizov A. A. et al., The North Atlantic Oscillation: A dominant factor in the variations of oceanic circulation systems of the Atlantic Ocean, *Doklady Earth Sciences*, 2016, V. 466, No. 1, pp. 100–104, DOI: 10.1134/S1028334X16010207.
4. Karlin L. N., Malinin V. N., Gordeeva S. M., Variability of hydrophysical characteristics in the Gulf Stream, *Oceanology*, 2013, V. 53, No. 4, pp. 401–409, DOI: 10.1134/S0001437013040048.
5. Karsakov A. L., Trofimov A. G., Antsiferov M. Yu. et al., *120 let okeanograficheskikh nablyudenii na razreze "Kol'skii meridian"* (120 years of oceanographic observations along the Kola Section), Murmansk: PINRO named after N. M. Knipovich, 2022, 145 p. (in Russian).
6. Krasheninnikova S. B., *Vodnye massy i perenosy tepla v Severnoi Atlantike* (Water masses and heat transport in the North Atlantic), Simferopol: IT "ARIAL", 2019, 124 p. (in Russian).
7. Lemeshko E. E., Lemeshko E. M., Novitskaya V. P., 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*, 2021, No. 2, pp. 47–64 (in Russian), DOI: 10.22449/2413-5577-2021-2-47-64.
8. Malinin V. N., *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoi informatsii* (Statistical methods for the analysis of hydrometeorological information), Saint Petersburg: Izd. RGGMU, 2008, 408 p. (in Russian).
9. Malinin V. N., The Gulf Stream and the climate of Europe, *Society. Environment. Development*, 2012, No. 1, pp. 214–220 (in Russian).
10. 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, V. 19, No. 3, pp. 281–294 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-281-294.
11. Malinin V. N., Angudovich Ya. I., Sea level as an indicator of interannual variability of water circulation and climate in the North Atlantic, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 5, pp. 335–353 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-335-353.
12. Malinin V. N., Vainovsky P. A., On the causes of the first warming of the Arctic in the 20th century, *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2018, V. 53, pp. 34–55 (in Russian).
13. Nesterov E. S., *Severoatlanticheskoe kolebanie: atmosfera i okean* (North Atlantic Oscillation: atmosphere and ocean), Moscow: Triada, 2013, 144 p. (in Russian).
14. 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 Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2018, V. 63 No. 3, pp. 345–362 (in Russian), DOI: 10.21638/spbu07.2018.306.
15. Asbjørnsen H., Årthun M., Skagseth Ø., Eldevik T., Mechanisms underlying recent Arctic Atlantification, *Geophysical Research Letters*, 2020, V. 47, Article e2020GL088036, DOI: 10.1029/2020GL088036.

16. Bailey D. A., Rhines P. B., Häkkinen 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, No. 5, pp. 497–516, DOI: 10.1007/s00382-005-0050-3.
17. Barnston A. G., Livesey R. E., Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns, *Monthly Weather Review*, 1987, V. 115, No. 6, pp. 1083–1126, DOI: 10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2.
18. Centurioni L. R., Gould W. J., Winter conditions in the Irminger Sea observed with profiling floats, *J. Marine Research*, 2004, V. 62, No. 3, pp. 313–336, DOI: 10.1357/0022240041446209.
19. Chafik L., Nilsen J. E. Ø., Dangendorf S. et al., North Atlantic Ocean Circulation and decadal sea level change during the altimetry era, *Scientific Reports*, 2019, V. 9, Article 1041, DOI: 10.1038/s41598-018-37603-6.
20. Chisholm L., Talbot T., Appleby W. et al., Projected changes to air temperature, sea-level rise, and storms for the Gulf of Maine region in 2050, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2021, V. 9, No. 1, Article 00059, 14 p., DOI: 10.1525/elementa.2021.00059.
21. Devilliers M., Olsen S. M., Langehaug H. R. et al., Constraining CMIP6 simulations for Atlantic Water in the Arctic using an AMOC-SST index, *Frontiers in Climate*, 2025, V. 7, Article 1550772, 14 p., DOI: 10.3389/fclim.2025.1550772.
22. Dickson R., Brown J., The production of North Atlantic Deep Water: Sources, rates, and pathways, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1994, V. 99, No. C6, pp. 12319–12341, DOI: 10.1029/94JC00530.
23. Ezer T., On the interaction between a hurricane, the Gulf Stream and coastal sea level, *Ocean Dynamics*, 2018, V. 68, pp. 1259–1272, DOI: 10.1007/s10236-018-1193-1.
24. Ezer T., Regional differences in sea level rise between the Mid-Atlantic Bight and the South Atlantic Bight: Is the Gulf Stream to blame?, *Earth's Future*, 2019, V. 7, No. 7, pp. 771–783, DOI: 10.1029/2019EF001174.
25. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al., The ERA5 global reanalysis, *Quarterly J. Royal Meteorological Soc.*, 2020, V. 146, No. 730, pp. 1999–2049, DOI: 10.1002/qj.3803.
26. Lim Y.-K., The East Atlantic/West Russia (EA/WR) teleconnection in the North Atlantic: climate impact and relation to Rossby wave propagation, *Climate Dynamics*, 2015, V. 44, No. 11–12, pp. 3211–3221, DOI: 10.1007/s00382-014-2381-4.
27. Marshall J., Schott F., Open-ocean convection: Observations, theory, and models, *Reviews of Geophysics*, 1999, V. 37, No. 1, pp. 1–64, DOI: 10.1029/98RG02739.
28. 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*, 2015, V. 142, pp. 126–143, DOI: 10.1016/j.jmarsys.2014.10.007.
29. Mayer M., Tsubouchi T., Winkelbauer S. et al. Recent variations in oceanic transports across the Greenland-Scotland Ridge, *State of the Planet*, 2023, V. 1-osr7, Article 14, 13 p., DOI: 10.5194/sp-1-osr7-14-2023.
30. 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, pp. 91–111, DOI: 10.1016/j.pocean.2014.10.006.
31. Mountain D. G., Labrador slope water entering the Gulf of Maine—Response to the North Atlantic Oscillation, *Continental Shelf Research*, 2012, V. 47, pp. 150–155, DOI: 10.1016/j.csr.2012.07.008.
32. Repschläger J., Garbe-Schönberg D., Weinelt M. et al., Holocene evolution of the North Atlantic subsurface transport, *Climate of the Past*, 2017, V. 13, P. 333–344, DOI: 10.5194/cp-13-333-2017.
33. Rhein M., Kieke D., Hüttl-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, pp. 1819–1832, DOI: 10.1016/j.dsr2.2010.10.061.
34. Rhein M., Kieke D., Steinfeldt R., Advection of North Atlantic Deep Water from the Labrador Sea to the southern hemisphere, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2015, V. 120, No. 4, pp. 2471–2487, DOI: 10.1002/2014JC010605.
35. Stramma L., Siedler G., Seasonal changes in the North Atlantic subtropical gyre, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1988, V. 93, No. C7, pp. 8111–8118, DOI: 10.1029/JC093iC07p08111.
36. Thompson D. W. J., Wallace J. M., The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields, *Geophysical Research Letters*, 1998, V. 25, No. 9, pp. 1297–1300, DOI: 10.1029/98GL00950.
37. Våge K., Papritz L., Håvik L. et al., Ocean convection linked to the recent ice edge retreat along east Greenland, *Nature Communications*, 2018, V. 9, Article 1287, DOI: 10.1038/s41467-018-03468-6.
38. Wang J., Zhang J., Watanabe E. et al., Is the Dipole Anomaly a major driver to record lows in Arctic summer sea ice extent?, *Geophysical Research Letters*, 2009, V. 36, No. 5, Article L05706, 5 p., DOI: 10.1029/2008GL036706.
39. Yashayaev I., Loder J. W., Further intensification of deep convection in the Labrador Sea in 2016, *Geophysical Research Letters*, 2017, V. 44, No. 3, pp. 1429–1438, DOI: 10.1002/2016GL071668.