

Межгодовая изменчивость водообмена Атлантики с Северным Ледовитым океаном по спутниковым данным

Е. Е. Лемешко, Е. М. Лемешко, С. В. Станичный

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия
E-mails: e.lemeshko@mhi-ras.ru, evgeny.lemeshko@mhi-ras.ru, sstanichny@mail.ru

С конца XX в. отмечается повышение температуры и объёма атлантических вод (АВ), поступающих в Северный Ледовитый океан (СЛО) через пролив Фрама и западную границу Баренцева моря, что привело к сокращению площади льда зимой в областях притока АВ. Однако возникающие погрешности в оценке водообмена через эти области вызывают неопределённости в оценке теплового и пресноводного баланса СЛО. Статья посвящена изучению зависимости водообмена от арктических и внеарктических типов атмосферной циркуляции на основе анализа поверхностной геострофической скорости, полученной из спутниковых альтиметрических данных. Район исследования охватывает Северо-Европейский бассейн, включая Норвежское, Гренландское и Баренцево моря, и субполярную область Атлантики. Показано, что геострофическая скорость является репрезентативной для оценки поступления АВ в СЛО через пролив Фрама и западную границу Баренцева моря. Для неё получены значимые ($p < 0,05$) регрессионные соотношения для оценивания расхода АВ и коэффициенты линейного тренда. За 2011–2020 гг. наблюдается ослабление как поступления поверхностных АВ в СЛО, так и выноса арктических вод через пролив Фрама. Получено, что на скорость поступления АВ через пролив Фрама наибольшее влияние оказывают Северно-Атлантическое колебание (САК), арктическое колебание (АК) и арктический диполь (АД) во время их положительной фазы. Обнаружен эффект синфазности индексов, когда скорость поступления АВ, усреднённая за одновременные интервалы положительных фаз индексов АК, САК и АД, обеспечивала расход АВ до $1,27 \text{ Св}$ ($1 \text{ Св} = 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$), что превышает его среднемноголетнее значение. Максимальное влияние на скорость выноса арктических вод через пролив Фрама оказывает отрицательная фаза Восточно-Атлантического колебания. На поступление АВ через западную границу Баренцева моря наибольшее влияние оказывают индексы АД < 0 и САК в положительной фазе. Эффект синфазности индексов проявляется в увеличении расхода поступления АВ в Баренцево море до $2,1 \text{ Св}$, что больше среднемноголетнего значения. Максимальная скорость выноса вод из Баренцева моря достигается, когда одновременно САК находится в положительной фазе, а Скандинавский индекс в отрицательной фазе.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, режимы циркуляции, водные массы, климатические индексы, альтиметрия, климатическая изменчивость Арктики, пролив Фрама, Баренцево море, реанализ

Одобрена к печати: 10.10.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-221-230

Введение

Актуальность настоящего исследования обусловлена важностью изучения факторов, влияющих на термохалинную структуру вод и пути поступления атлантических вод (АВ) в Северный Ледовитый океан (СЛО), что в свою очередь влияет на ледовитость и толщину льда.

Межгодовая изменчивость циркуляции водных масс в СЛО в значительной степени обусловлена воздействием атмосферы. Поле ветра определяется пространственно-временной изменчивостью атмосферного давления над Арктикой и Северным полушарием, его характерные особенности описываются климатическими индексами (Barnston, Livezey, 1987). Индекс арктического колебания (АК) воспроизводит ситуации повышения или понижения атмосферного давления над Арктикой, отображая интенсификацию широтного обмена. Индекс арктического диполя (АД) отображает интенсификацию меридионального обмена. Крупномасштабная изменчивость атмосферы, связанная с Северно-Атлантическим колебанием (САК) и Восточно-Атлантическим колебанием (ВАК), влияет на смену режимов океанической циркуляции, процессы теплообмена между океаном и атмосферой, измене-

ние площади льда в Арктике (Букатов и др., 2023; Иванов, 2021; Wang et al., 2023). Северно-Атлантическое колебание является основным модулятором атмосферной циркуляции в Северной Атлантике и поступления АВ в Северо-Европейский бассейн (СЕБ) (Kawasaki, Nasumi, 2016; Raj et al., 2018). Арктическое колебание модулирует приток тёплых течений АВ в СЛО (Лемешко, 2023; Armitage et al., 2018; Proshutinsky et al., 2015), влияет на приток воды из Северной Атлантики через СЕБ. Чередование фаз АД создаёт так называемый триггерный механизм распределения потоков АВ: с 2007 по 2021 г. этот распределительный механизм ослаблял приток АВ через пролив Фрама, но усиливал экспорт льда из СЛО через пролив и в то же время усиливал поступление АВ в Баренцево море (Polyakov et al., 2023).

Поэтому цель работы заключается в установлении новых физических закономерностей водообмена в СЛО через пролив Фрама и западную границу Баренцева моря, оценке межгодовой изменчивости скорости поверхностных геострофических течений по данным альтиметрии в зависимости от типов атмосферной циркуляции.

Район исследований, используемые данные

Район исследований — СЕБ, включая Норвежское, Гренландское и Баренцево моря, и субполярная область Атлантики. В работе использовались среднемесячные величины абсолютной динамической топографии и абсолютных геострофических течений по данным альтиметрии за 2011–2020 гг. с разрешением по пространству 20 км, с учётом областей океана, покрытых льдом (https://www.crom.ucl.ac.uk/dynamic_topography).

Для анализа привлекались климатические индексы: АК, АД, САК, ВАК и Скандинавский индекс (СКА) (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>, <https://www.pmel.noaa.gov/arctic-zone/bering-sea-indicators/data/index.php>).

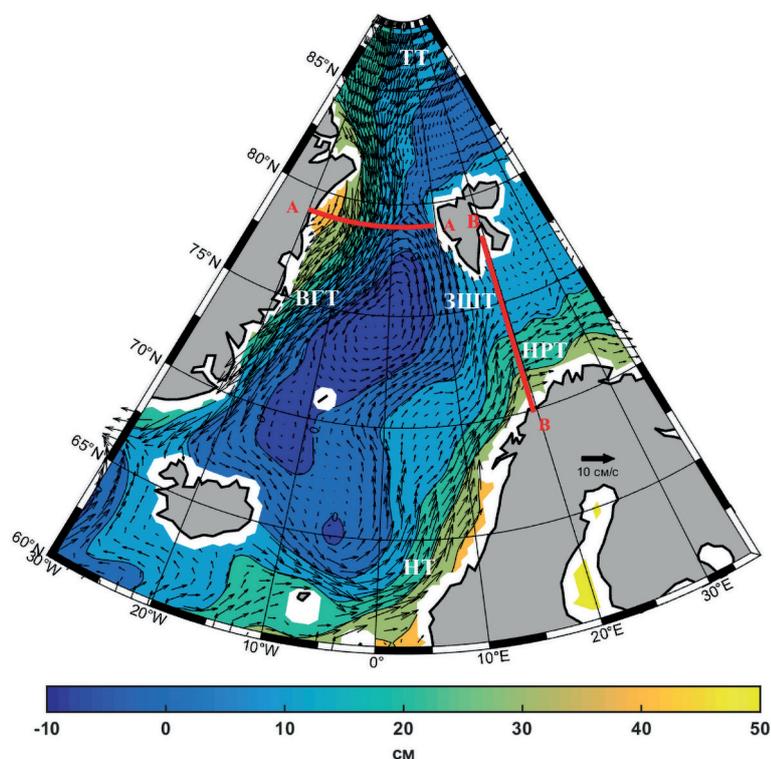


Рис. 1. Район исследований, разрезы через пролив Фрама 79° с. ш. (AA) и западную границу Баренцева моря 19,5° в. д. (BB) и схема средних поверхностных геострофических течений за 2011–2020 гг.: НТ — Норвежское течение; НРТ — Нордкапское течение; ЗШТ — Западно-Шпицбергенское течение; ВГТ — Восточно-Гренландское течение; ТТ — Трансарктическое течение. Шкала отображает абсолютную динамическую топографию, стрелка — масштаб для вектора скорости

Использовались временные ряды расходов АВ по данным реанализа TOPAZ4b через разрезы, которые в основном совпадают с разрезами АА и ВВ на *рис. 1* (см. с. 222): для пролива Фрама по 78,5–78,9° с.ш. от 7,2° з.д. до 9° в.д.; для Баренцева моря по 19,5–20° в.д. от 71,5 до 73,5° с.ш. (https://data.marine.copernicus.eu/product/omi_circulation_voltrans_arctic_averaged/description).

Результаты и обсуждение

Динамическая топография и скорость поверхностных геострофических течений, осреднённые по спутниковым данным за 2011–2020 гг., дают картину средней циркуляции в районе исследований. На *рис. 1* выделены основные течения в Норвежском и Гренландском морях: Норвежское (НТ), Нордкапское (НРТ), Западно-Шпицбергенское (ЗШТ), Восточно-Гренландское (ВГТ) и Трансарктическое (ТТ), а в Гренландском море выделяется циклонический круговорот. Для оценки водообмена на *рис. 1* приведены створы АА по 79° с.ш. и от 17° з.д. до 9° в.д. для пролива Фрама и ВВ по 19,5° в.д. от 71 до 77,5° с.ш. для западной границы Баренцева моря.

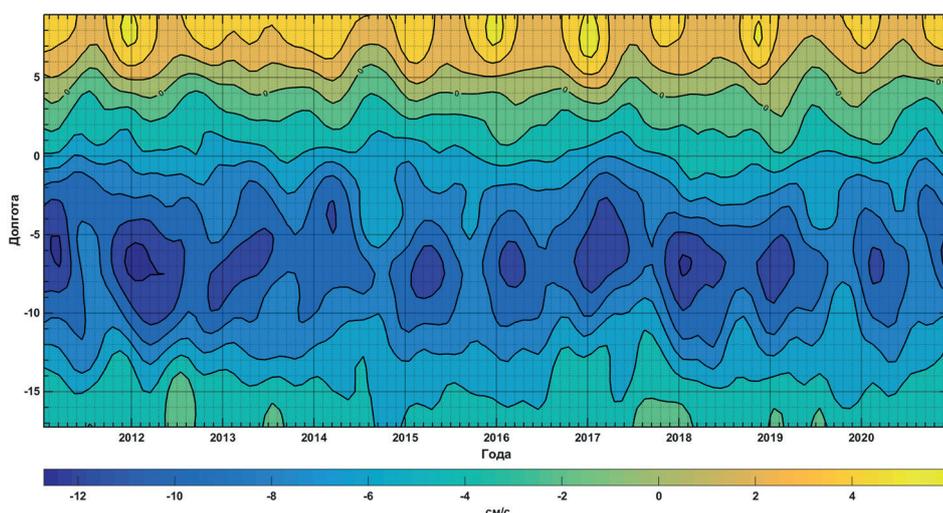


Рис. 2. Диаграмма Ховмёллера меридиональной компоненты геострофической скорости течений через разрез АА в проливе Фрама за 2011–2020 гг.

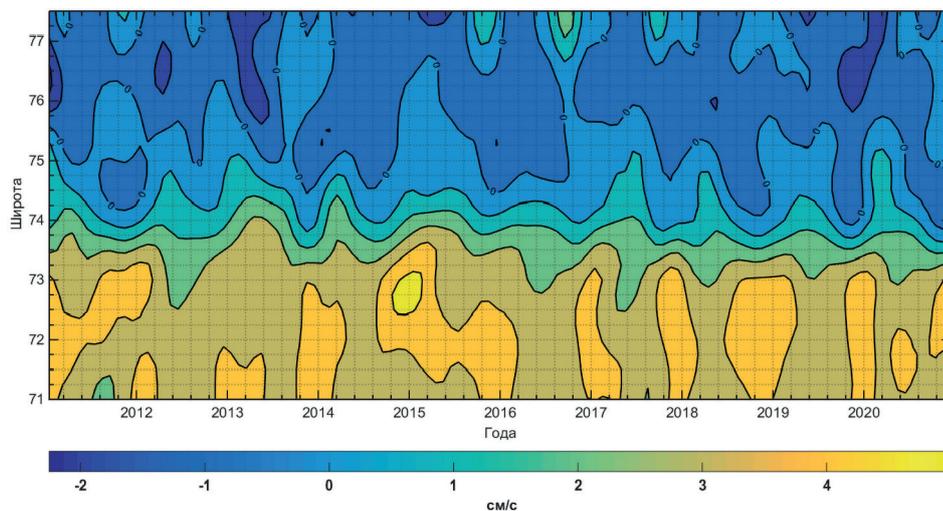


Рис. 3. Диаграмма Ховмёллера зональной компоненты геострофической скорости течений через разрез ВВ в Баренцевом море за 2011–2020 гг.

Временная изменчивость поверхностных геострофических течений через разрезы АА и ВВ изучалась с помощью диаграмм Ховмёллера (*dat.* Новмёллер) (*рис. 2, 3*, см. с. 223). В проливе Фрама выделяется существенная межгодовая изменчивость скорости ЗШТ (максимумы в 2012, 2016, 2017, 2019 гг.), которое несёт АВ в СЛО (см. *рис. 1, 2*). Максимум скорости ВГТ, несущего распреснённые холодные арктические воды, наблюдается в 2012, 2017, 2018 гг. (см. *рис. 1, 2*). Средняя скорость V_{FR+} была получена осреднением по положительным значениям диаграммы для ЗШТ, а V_{FR-} — по отрицательным значениям скорости для ВГТ (см. *рис. 2*). Аналогично была установлена скорость V_{BAR+} для НРТ и V_{BAR-} для Восточно-Шпицбергенского течения (ВШТ) в Баренцевом море (см. *рис. 3*). Средние значения, среднеквадратичное отклонение (СКО) и коэффициенты линейного тренда средней скорости течений через разрезы АА в проливе Фрама и ВВ в Баренцевом море за 2011–2020 гг. приведены в *табл. 1*. Полученные значимые оценки трендов скорости V_{FR+} равны $-0,06 \pm 0,03$ см·с⁻¹·год⁻¹, а для V_{FR-} тренд составил $+0,09 \pm 0,02$ см·с⁻¹·год⁻¹ (*табл. 1*). Для разреза ВВ значимых трендов скорости течений не выявлено. Тренды скорости для пролива Фрама демонстрируют ослабление как скорости течений V_{FR+} для ЗШТ, так и V_{FR-} для ВГТ. Таким образом, за 2011–2020 гг. наблюдается ослабление как поступления поверхностных АВ в СЛО, так и выноса АВ ВГТ. Возникает вопрос — насколько репрезентативно поверхностные геострофические течения отражают поступления АВ через проливы в СЛО. Для ответа использовались данные реанализа TOPAZ4b по расходу АВ через разрезы, для выделения АВ применялись критерии: для Баренцева моря температура воды $T > 3$ °С, для пролива Фрама $T > 2$ °С (https://data.marine.copernicus.eu/product/omi_circulation_voltrans_arctic_averaged/description).

Таблица 1. Среднее значение, СКО и коэффициент линейного тренда средней скорости течений V и расхода АВ WT ($1 \text{ Св} = 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$) через разрезы АА в проливе Фрама и ВВ в Баренцевом море за 2011–2020 гг. для уровня значимости $p < 0,05$. Прочерк означает отсутствие значимой оценки для $p < 0,05$

Параметр	Среднее значение	СКО	Тренд
V_{FR+}	$3,2 \pm 0,11$ см/с	1,2 см/с	$-0,06 \pm 0,03$ см·с ⁻¹ ·год ⁻¹
V_{FR-}	$-5,82 \pm 0,07$ см/с	0,8 см/с	$0,09 \pm 0,02$ см·с ⁻¹ ·год ⁻¹
V_{BAR+}	$2,68 \pm 0,05$ см/с	0,5 см/с	—
V_{BAR-}	$-0,84 \pm 0,04$ см/с	0,5 см/с	—
WT_{FR}	$1,13 \pm 0,06$ Св	0,66 Св	$0,033 \pm 0,02$ Св/год
WT_{BAR}	$2,03 \pm 0,05$ Св	0,54 Св	—

Для створа АА данные реанализа захватывают область рециркуляции АВ циклоническим вихрем около $0-2^\circ$ в.д. с отрицательной скоростью (см. *рис. 1, 2*), что может приводить к занижению величины расхода АВ при соблюдении критерия $T > 2$ °С. Учитывая, что геострофическая скорость по альтиметрии имеет значимую корреляцию 0,54 с измеренной скоростью течений на глубине около 75 м (Doglioni et al., 2023) в проливе Фрама, а глубина слоя АВ для $T > 2$ °С в среднем достигает 350 м, то можно считать, что геострофическая скорость репрезентативно отражает изменчивость расхода АВ (Kawasaki, Hasumi, 2016). Средний расход АВ через пролив Фрама составил $WT_{FR} = 1,13 \pm 0,06$ Св, тренд — $0,033 \pm 0,02$ Св/год. Сопоставление положительной зональной компоненты геострофической скорости, осреднённой по разрезу ВВ, с расходом АВ показывает синфазность сезонного цикла и межгодовой изменчивости этих рядов (*рис. 4*, см. с. 225). Средний расход АВ через разрез ВВ $WT_{BAR} = 2,03 \pm 0,05$ Св, величина тренда незначима, а изменчивость расхода АВ через пролив Фрама выше: СКО = 0,66 Св против 0,54 Св для разреза ВВ (*табл. 1*). Разнонаправленность трендов V_{FR+} и WT_{FR} указывает, что в глубоководном слое расход АВ в Арктический бассейн увеличивался. Однако корреляция расхода WT_{FR} и скорости V_{FR+} после удаления трендов из рядов остаётся высокой — 0,54 для уровня значимости $p < 0,01$. А оценка регрессии АВ

для пролива Фрама от средней скорости V_{FR+} через АА составляет $0,28 \pm 0,04$ Св·см⁻¹·с для $p < 0,05$. При этом коэффициент линейной регрессии расхода АВ от средней скорости V_{BAR+} через ВВ равен $0,37 \pm 0,09$ Св·см⁻¹·с.

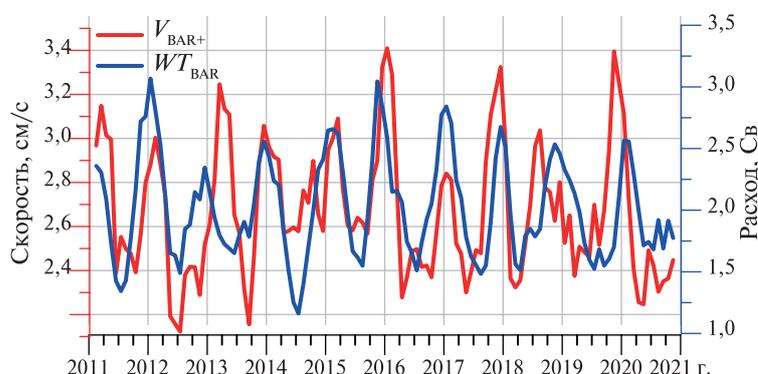


Рис. 4. Средняя по разрезу ВВ положительная зональная компонента геострофической скорости V_{BAR+} и расход АВ в Баренцево море

Далее следует оценить влияние различных типов крупномасштабной атмосферной циркуляции на изменчивость поверхностных течений через разрезы АА и ВВ. Для этого скорость течений осреднялась за положительную и отрицательную фазу соответствующих климатических индексов. В табл. 2 приведены значимые оценки для положительных и отрицательных значений скорости течений для указанных индексов и относительной завихренности скорости течений (ζ), осреднённой по акватории Гренландского моря. Во время положительной фазы индекса АК, когда центральная часть Арктики занята циклоном, наблюдается увеличение аномалий скорости течений, что способствует притоку тёплых АВ в сектор СЕБ, в том числе и в Баренцево море. Во время отрицательной фазы АК, когда над Арктикой находится антициклоническая область давления, знаки аномалии скорости течений меняются на противоположные, что уменьшает приток тёплых АВ в СЛО (Лемешко, 2023). Оказалось, что максимальные значения скорости ЗШТ достигаются во время положительной фазы АК, САК и СКА (табл. 2). При этом значимые корреляции с V_{FR+} получены для следующих индексов: 0,46 (САК), 0,65 (АД), 0,36 (ζ).

Таблица 2. Среднее значение скорости течений (см/с) в проливах (разрезы АА и ВВ) и средняя завихренность скорости течений по акватории Гренландского моря за 2011–2020 гг. ζ , нормированная на параметр Кориолиса f . Параметры осреднены за положительную «+» и отрицательную «-» фазу климатических индексов. Прочерк означает отсутствие значимой оценки для $p < 0,05$

Параметр	2011–2020 гг.	АК «+»	АК «-»	АД «+»	АД «-»	САК «+»	САК «-»	ВАК «+»	ВАК «-»	СКА «+»	СКА «-»
V_{FR+}	$3,2 \pm 0,11$	3,36	3,00	3,09	3,22	3,36	2,93	—	—	3,34	3,09
V_{FR-}	$-(5,82 \pm 0,07)$	-5,97	-5,64	-5,81	-5,84	-6,00	-5,53	-5,71	-6,09	-5,73	-5,89
V_{BAR+}	$2,68 \pm 0,05$	2,73	2,62	2,66	2,79	2,80	2,48	—	2,63	—	—
V_{BAR-}	$-0,84 \pm 0,04$	—	-0,83	-0,80	-1,01	-0,88	-0,77	—	—	-0,79	-0,87
ζ/f	$0,26 \pm 0,07$	—	—	0,23	0,27	0,27	0,25	—	—	0,27	0,25

Пространственная изменчивость скорости течений во время положительной фазы АК проявляется как усиление ЗШТ и НРТ, возрастает скорость в районе НТ, т.е. увеличивается поступление АВ в СЛО (рис. 5, см. с. 226). Арктический диполь оказывает влияние на поступление АВ в отрицательной фазе. Для разреза ВВ это проявляется в превышении сред-

него значения $V_{\text{BAR}+} = 2,68 \text{ см/с}$ до $2,79 \text{ см/с}$ при $\text{АД} < 0$ (см. *рис. 5а*) и $V_{\text{BAR}+} = 2,8 \text{ см/с}$ при положительной фазе САК, при этом для САК максимальное из всех индексов значение корреляции с $V_{\text{BAR}+}$ соответствует $0,51$ (см. *табл. 2*, *рис. 5б*). Для ВШТ максимальная скорость $V_{\text{BAR}-} = -1,01 \text{ см/с}$ достигается при отрицательной фазе АД и $-0,88 \text{ см/с}$ при положительной фазе САК и отрицательной САК (*табл. 2*). При положительной фазе АК, САК и отрицательной фазе ВАК увеличивается скорость ВГТ, т. е. усиливается вынос арктических вод (*табл. 2*).

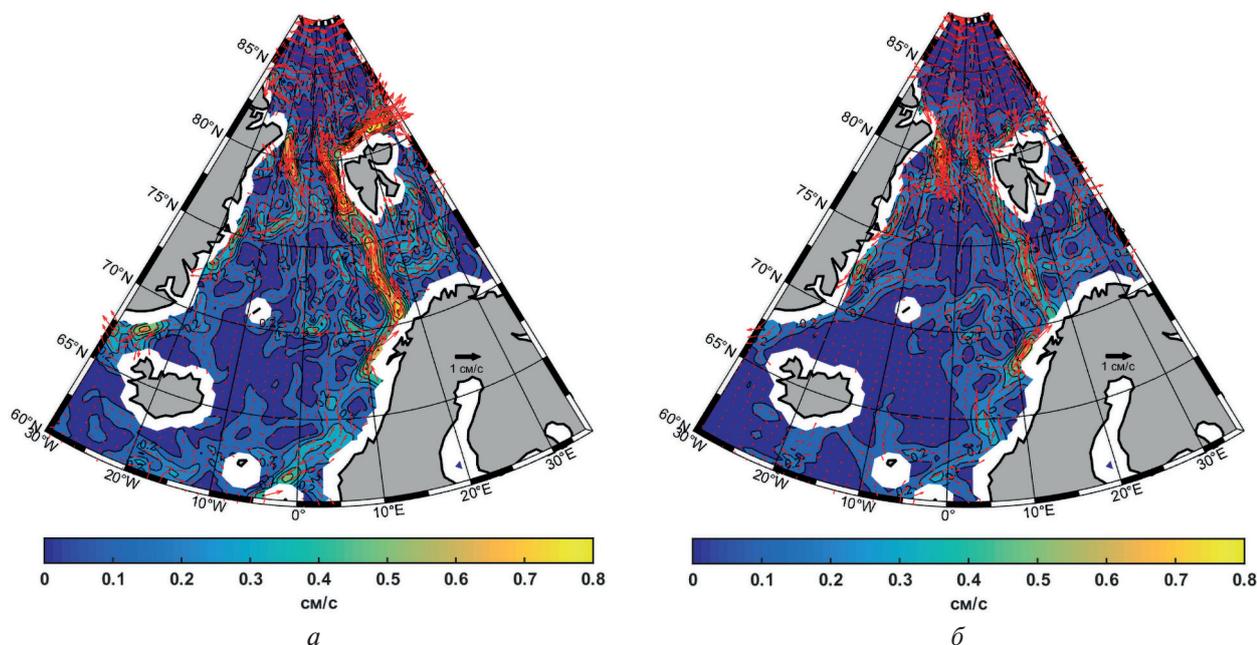


Рис. 5. Аномалии скорости поверхностных геострофических течений за 2011–2020 гг., осреднённые за период отрицательной фазы АД (*а*) и положительной фазы САК (*б*). Шкала отображает модуль аномалий скорости, стрелка — масштаб для вектора скорости

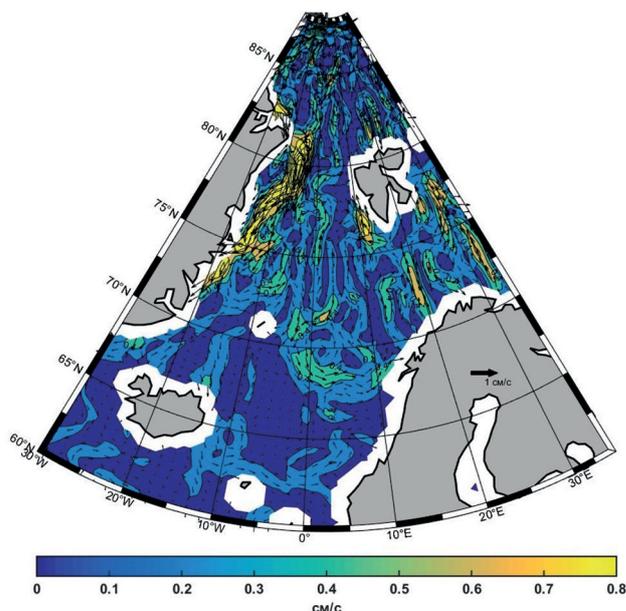


Рис. 6. Аномалии скорости поверхностных геострофических течений, осреднённые за периоды отрицательной фазы ВАК за 2011–2020 гг. Шкала отображает модуль аномалий скорости, стрелка — масштаб для вектора скорости

Максимальное влияние на ВГТ оказывает ВАК, поскольку даёт максимальное значение корреляции 0,53. Отрицательный индекс ВАК оказывает максимальное воздействие на ВГТ: $V_{FR-} = -6,09$ см/с, а положительный индекс ослабляет ВГТ — $V_{FR-} = -5,71$ см/с, на величину остальных скоростей не оказывает значимого влияния (табл. 2, рис. 6, см. с. 226). Во время положительной фазы САК, СКА и отрицательной фазы индекса АД завихренность максимальна и превышает среднее значение $\zeta/f = 0,26 \pm 0,07$, а при положительной фазе АД завихренность минимальна (табл. 2). Таким образом, индексы АД, САК и СКА в основном влияют на завихренность в Гренландском море и модулируют циклоническую рециркуляцию АВ (см. рис. 1).

Межгодовая изменчивость течений

Средние значения скорости поверхностных геострофических течений V_{FR+} , соответствующие ЗШТ, максимальны за положительные фазы индексов АК, САК и отрицательную фазу АД (табл. 2). Совместное воздействие рассматриваемых структур крупномасштабной атмосферной циркуляции проявляется как увеличение или ослабление скорости течений через разрезы во время периодов, когда их климатические индексы синфазны. Средняя скорость V_{FR+} , осреднённая за одновременные интервалы положительных фаз индексов АК, САК и отрицательную фазу АД, равна $3,74 \pm 0,22$ см/с, что превышает средние значения скорости при осреднении только по каждому индексу (табл. 2). В межгодовой изменчивости выделяются максимумы V_{FR+} зимой 2011/2012, 2015/2016, 2016/2017 и 2018/2019 г. (см. рис. 2), когда выполняется указанное условие синфазности. Длительность такого явления составила 4 мес подряд зимой 2011/2012 г. и $V_{FR+} = 6,6$ см/с; 2 мес 2015/2016 г. и $V_{FR+} = 5,3$ см/с; 3 мес 2016/2017 г. и $V_{FR+} = 6,8$ см/с; 3 мес 2018/2019 г. и $V_{FR+} = 5,5$ см/с; все величины скорости превысили среднее значение $3,74 \pm 0,22$ см/с. Используя регрессионное соотношение для пролива Фрама, получаем, что расход АВ увеличивается до 1,29 Св или на 14 %, что превышает среднее значение $WT_{FR} = 1,13 \pm 0,06$ Св. Максимальная скорость ВГТ V_{FR-} достигается, когда одновременно САК находится в положительной фазе (см. рис. 5б), а ВАК в отрицательной (см. рис. 6): средняя скорость равна $-6,3 \pm 0,16$ см/с, что превышает средние значения скорости при осреднении только по каждому индексу (табл. 2).

Длительность интервала зимой 2010/2011 г. составила 2 мес и $V_{FR-} = -7,0$ см/с; 2011/2012 г. — 6 мес и $V_{FR-} = -8,1$ см/с; 2017/2018 г. — 2 мес и $V_{FR-} = -7,1$ см/с (см. рис. 2). Для разреза ВВ максимальная скорость НРТ V_{BAR+} достигается, когда одновременно САК находится в положительной фазе, а АД < 0 , тогда скорость равна $2,89 \pm 0,08$ см/с, что превышает средние значения скорости при осреднении только по каждому индексу (табл. 2). Выделяется максимум зимой 2014/2015 г., когда длительность синфазности составила 6 мес и $V_{BAR+} = 3,7$ см/с (см. рис. 3). Для ВШТ максимальная скорость достигается при АД < 0 либо когда одновременно САК находится в положительной фазе, а СКА — в отрицательной, $V_{BAR-} = -0,89 \pm 0,06$ см/с (табл. 2). Отмечается максимальная скорость летом 2013 г., когда длительность фазы составила 4 мес и $V_{BAR-} = -1,2$ см/с, и зимой 2020 г. при длительности фазы 3 мес и $V_{BAR-} = -1,6$ см/с (см. рис. 3).

Выводы

Поверхностная геострофическая скорость по данным альтиметрии верно представляет известную систему течений в СЕБ. Скорость является репрезентативной для оценки поступления АВ в СЛО через пролив Фрама (для $T > 2$ °С) и западную границу Баренцева моря (для $T > 3$ °С). После удаления трендов из рядов для них получены значимые ($p < 0,05$) регрессионные соотношения для расхода АВ: $(0,28 \pm 0,04)V_{FR+}$ Св·см⁻¹·с + 0,22 Св для пролива Фрама и $(0,37 \pm 0,09)V_{BAR+}$ Св·см⁻¹·с + 1,03 Св для западной границы Баренцева моря. Средний расход АВ через пролив Фрама по данным реанализа за 2011–2020 гг. составил $WT_{FR} = 1,13 \pm 0,06$ Св, тренд $0,033 \pm 0,02$ Св/год; через западную границу Баренцева моря —

$WT_{\text{BAR}} = 2,03 \pm 0,05$ Св, но величина тренда незначима, а изменчивость расхода АВ через пролив Фрама выше: СКО = 0,66 Св против 0,54 Св для разреза для Баренцева моря. Получены значимые оценки трендов средней геострофической скорости АВ через пролив Фрама в СЛО — $V_{\text{FR}+} = -0,06 \pm 0,03$ см·с⁻¹·год⁻¹, а для средней скорости арктических вод из СЛО $V_{\text{FR}-}$ тренд составил $+0,09 \pm 0,02$ см·с⁻¹·год⁻¹. Для западной границы Баренцева моря значимых трендов скорости течений не выявлено. Таким образом, за 2011–2020 гг. наблюдается ослабление как скорости выноса арктических вод ВГТ, так и скорости поступления поверхностных АВ в СЛО через пролив Фрама, что согласуется с результатами анализа инструментальных наблюдений скорости течений и данных реанализа ORAS5 (Polyakov et al., 2023). Разнонаправленность трендов средней поверхностной геострофической скорости $V_{\text{FR}+}$ и расхода АВ по данным реанализа WT_{FR} указывает, что интегрально по всей глубине слоя с температурой более 2 °С расход АВ в Арктический бассейн увеличивался. Однако корреляция расхода WT_{FR} и скорости $V_{\text{FR}+}$ после удаления трендов из рядов остаётся высокой и равна 0,54 для уровня значимости $p < 0,01$.

Получены оценки влияния различных типов крупномасштабной атмосферной циркуляции на изменчивость поверхностных течений через разрезы АА и ВВ. Для этого скорость течений осреднялась за положительную и отрицательную фазу соответствующих климатических индексов. Оказалось, что максимальные значения скорости ЗШТ достигаются во время положительной фазы АК, САК, СКА и отрицательной АД. При этом значимые корреляции $V_{\text{FR}+}$ получены для следующих индексов: 0,46 (САК) и 0,65 (АД). Максимальное воздействие на скорости ВГТ (–6,09 см/с) оказывает отрицательная фаза ВАК. Индексы АД, САК и СКА влияют на завихренность скорости течений и модулируют циклоническую рециркуляцию АВ в Гренландском море.

Для НТ максимальная средняя скорость достигается при отрицательной фазе АД ($V_{\text{BAR}+} = 2,79$ см/с) и при положительной фазе САК ($V_{\text{BAR}+} = 2,8$ см/с) и АК ($V_{\text{BAR}+} = 2,73$ см/с), при этом для САК максимальное из всех индексов значение корреляции с $V_{\text{BAR}+}$ 0,51. Для ВШТ максимальные скорости $V_{\text{BAR}-} = -0,88$ см/с отмечаются при положительной фазе САК и отрицательной СКА и при отрицательной АД до –1,01 см/с.

Результаты совместного воздействия рассматриваемых структур крупномасштабной атмосферной циркуляции во время периодов, когда их климатические индексы одновременно находятся в положительной/отрицательной фазе (эффект синфазности), заключались в усилении/ослаблении скорости течений через проливы. Значение скорости ЗШТ $V_{\text{FR}+}$, осреднённое за одновременные интервалы положительных фаз индексов АК, САК и АД < 0, равно $3,74 \pm 0,22$ см/с, что превышает средние значения скорости при осреднении только по каждому индексу. Используя регрессионное соотношение для пролива Фрама, было получено, что расход АВ увеличивается в периоды синфазности индексов до 1,29 Св или на 14 %, что превышает среднее значение $WT_{\text{FR}} = 1,13 \pm 0,06$ Св. Максимальная скорость ВГТ до $-6,3 \pm 0,16$ см/с достигалась, когда одновременно САК находится в положительной фазе, а ВАК в отрицательной. Максимальная скорость НРТ $V_{\text{BAR}+} = 2,89 \pm 0,08$ см/с отмечается, когда одновременно САК находится в положительной фазе и АД < 0, при этом расход АВ в Баренцево море увеличивается до 2,1 Св, что превышает среднее значение $2,03 \pm 0,05$ Св. Эффект синфазности, когда САК находится в положительной фазе, а СКА < 0, увеличивает скорость ВШТ до $-0,89 \pm 0,06$ см/с. Таким образом, на поступление АВ в СЛО через пролив Фрама основное влияние оказывает изменчивость крупномасштабной атмосферной циркуляции, связанной с климатическими индексами АД, АК и САК. Кроме того, максимальная скорость ЗШТ $V_{\text{FR}+}$ и, соответственно, максимальный расход АВ достигаются во время синхронных положительных фаз индексов АК, САК и АД < 0. На поступление АВ через западную границу Баренцева моря основное влияние оказывают АД и САК. При этом максимальная скорость НРТ $V_{\text{BAR}+}$ и максимальный расход АВ происходят во время синхронных фаз индексов АД < 0 и САК > 0. Понимание физических механизмов, задействованных во взаимосвязях между влиянием атмосферы на изменчивость уровня и течений океана, позволит оценить развитие прямых и обратных связей в климатической системе Арктики. Полученные результаты показывают возможность использования данных альтиметрии для ретроспектив-

ных расчётов водообмена субполярной Атлантики и СЛО и валидации модельных расчётов общей циркуляции СЛО для различных типов ветрового воздействия.

Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» по темам FNNN-2024-0016 и FNNN-2024-0012.

Литература

1. Букатов А. А., Соловей Н. М., Павленко Е. А. Региональные особенности плотностной стратификации вод и характеристик внутренних волн в арктических морях // Морской гидрофиз. журн. 2023. Т. 39. № 6. С. 779–796.
2. Иванов В. В. 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.
3. Лемешко Е. Е. Межгодовая изменчивость режимов циркуляции вод Северного Ледовитого океана // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 48–64. DOI: 10.29039/2413-5577-2023-1-48-64.
4. Armitage T. W. K., Bacon S., Kwok R. Arctic sea level and surface circulation response to the Arctic Oscillation // Geophysical Research Letters. 2018. V. 45. Iss. 13. P. 6576–6584. DOI: 10.1029/2018GL078386.
5. Barnston A. G., Livezey R. E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // Monthly Weather Review. 1987. V. 115. P. 1083–1126.
6. Doglioni F., Ricker R., Rabe B. et al. Sea surface height anomaly and geostrophic current velocity from altimetry measurements over the Arctic Ocean (2011–2020) // Earth System Science Data. 2023. V. 15. Iss. 1. P. 225–263. DOI: 10.5194/essd-15-225-2023.
7. Kawasaki T., Hasumi H. The inflow of Atlantic water at the Fram Strait and its interannual variability // J. Geophysical Research: Oceans. 2016. V. 121. Iss. 1. P. 502–519. DOI: 10.1002/2015JC011375.
8. Polyakov I. V., Ingvaldsen R. B., Pnyushkov A. V. et al. Fluctuating Atlantic inflows modulate Arctic atlantification // Science. 2023. V. 381. Iss. 6661. P. 972–979. DOI: 10.1126/science.adh5158.
9. Proshutinsky A., Dukhovskoy D., Timmermans M-L. et al. Arctic circulation regimes // Philosophical Transactions of Royal Society A. 2015. V. 373. Iss. 2052. Article 20140160. 18 p. DOI: 10.1098/rsta.2014.0160.
10. Raj R. P., Nilsen J. E. Ø., Johannessen J. A. et al. Quantifying Atlantic water transport to the Nordic Seas by remote sensing // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 216. P. 758–769. DOI: 10.1016/j.rse.2018.04.055.
11. Wang Q., Shu Q., Wang S. et al. A review of Arctic–Subarctic ocean linkages: Past changes, mechanisms, and future projections // Ocean–Land–Atmosphere Research. 2023. V. 2. Article 0013. 39 p. DOI: 10.34133/olar.0013.

Interannual variability of Atlantic–Arctic Ocean water exchange based on satellite data

E. E. Lemeshko, E. M. Lemeshko, S. V. Stanichny

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia
E-mails: e.lemeshko@mhi-ras.ru, evgeny.lemeshko@mhi-ras.ru, sstanichny@mail.ru

Since the end of the 20th century, there has been an increase in the temperature and volume of Atlantic waters (AW) entering the Arctic Ocean (AO) through the Fram Strait and the Barents Sea Opening (BSO), which has led to a reduction in the area of ice in winter in the areas of AW inflow. However, the resulting errors in assessing water exchange through these straits cause uncertainties in assessing the heat and freshwater balance of the AO. The paper is devoted to the study of the dependence of water exchange on Arctic and extra-Arctic types of atmospheric circulation based on the analysis of surface geostrophic velocities obtained from satellite altimetry data. The study area covers

the Norwegian, Greenland and Barents Seas, and the subpolar region of the Atlantic. It is shown that geostrophic velocities are representative for assessing the inflow of AW to the AO through the Fram Strait and BSO. For it, significant ($p < 0.05$) regression coefficients for measuring the AW transport and linear trend coefficients were obtained. A weakening of both the influx of surface AW into the AO and the outflow of Arctic waters through the Fram Strait was observed in 2011–2020. It was found that the rate of AW influx through the Fram Strait is most influenced by the North Atlantic Oscillation (NAO), Arctic Oscillation (AOS) during their positive phase and Arctic Dipole (AD). An effect of index synchronicity was found, when the AW influx rates averaged over simultaneous intervals of positive phases of the AOS, NAO and $AD < 0$ indices provided AW transport of up to 1.27 Sv which exceeds its long-term average. The negative phase of the East Atlantic Oscillation has the greatest influence on the rate of outflow of Arctic waters through the Fram Strait. The $AD < 0$ and NAO in the positive phase have the greatest impact on the AW inflow through the BSO. The effect of their synchronicity is manifested in an increase in the inflow rate of AB entering the Barents Sea to 2.1 Sv which is higher than the long-term average. The negative phase of the East Atlantic Oscillation has the greatest influence on the rate of outflow of Arctic waters through the Fram Strait. The maximum rate of water outflow from the Barents Sea is achieved when simultaneously the NAO is in a positive phase and the Scandinavian index is in a negative phase.

Keywords: Arctic Ocean, circulation patterns, water masses, climate indices, altimetry, Arctic climate variability, Fram Strait, Barents Sea, reanalysis

Accepted: 10.10.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-221-230

References

1. Bukatov A. A., Solovei N. M., Pavlenko E. A., Regional features of water density stratification and internal wave characteristics in the Arctic Seas, *Physical Oceanography*, 2023, V. 39, Iss. 6, pp. 731–746.
2. Ivanov V. V., Present changes in hydrometeorological conditions in the Arctic Ocean associated with reduction of the sea ice cover, *Gidrometeorologiya i Ekologiya*, 2021, No. 64, pp. 407–434 (in Russian), DOI: 10.33933/2713-3001-2021-64-407-434.
3. Lemeshko E. E., Interannual variability of water circulation regimes in the Arctic Ocean, *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, 2023, No. 1, pp. 48–64, DOI: 10.22449/2413-5577-2023-1-48-64.
4. Armitage T. W. K., Bacon S., Kwok R., Arctic sea level and surface circulation response to the Arctic Oscillation, *Geophysical Research Letters*, 2018, V. 45, Iss. 13, pp. 6576–6584, DOI: 10.1029/2018GL078386.
5. Barnston A. G., Livezey R. E., Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns, *Monthly Weather Review*, 1987, V. 115, pp. 1083–1126.
6. Doglioni F., Ricker R., Rabe B. et al., Sea surface height anomaly and geostrophic current velocity from altimetry measurements over the Arctic Ocean (2011–2020), *Earth System Science Data*, 2023, V. 15, Iss. 1, pp. 225–263, DOI: 10.5194/essd-15-225-2023.
7. Kawasaki T., Hasumi H., The inflow of Atlantic water at the Fram Strait and its interannual variability, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2016, V. 121, Iss. 1, pp. 502–519, DOI: 10.1002/2015JC011375.
8. Polyakov I. V., Ingvaldsen R. B., Pnyushkov A. V. et al., Fluctuating Atlantic inflows modulate Arctic atlantification, *Science*, 2023, V. 381, Iss. 6661, pp. 972–979, DOI: 10.1126/science.adh5158.
9. Proshutinsky A., Dukhovskoy D., Timmermans M-L. et al., Arctic circulation regimes, *Philosophical Trans. of Royal Society A*, 2015, V. 373, Iss. 2052, Article 20140160, 18 p., DOI: 10.1098/rsta.2014.0160.
10. Raj R. P., Nilsen J. E. Ø., Johannessen J. A. et al., Quantifying Atlantic water transport to the Nordic Seas by remote sensing, *Remote Sensing of Environment*, 2018, V. 216, pp. 758–769, DOI: 10.1016/j.rse.2018.04.055.
11. Wang Q., Shu Q., Wang S. et al., A review of Arctic–Subarctic ocean linkages: Past changes, mechanisms, and future projections, *Ocean–Land–Atmosphere Research*, 2023, V. 2, Article 0013, 39 p., DOI: 10.34133/olar.0013.