

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

Научная статья

УДК 551.465.4:551.466.8:556.532

EDN: JXNZTE

Исследование пространственно-временной изменчивости стратификации плотности и характеристик внутренних волн в Баренцевом и Карском морях

А. А. Букатов, Н. М. Соловей , Е. А. Павленко

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

 *nele7@mail.ru*

Поступила в редакцию 09.04.2025; одобрена после рецензирования 10.07.2025;
принята к публикации 10.11.2025.

Аннотация

Цель. Исследование пространственно-временной изменчивости вертикальной структуры поля плотности и характеристик внутренних волн на климатическом масштабе в Баренцевом и Карском морях – цель настоящей работы.

Методы и результаты. На основе данных реанализа *ORAS5* о среднемесячных значениях потенциальной температуры и солёности в узлах ~10-километровой сетки за период 1958–2022 гг. рассчитана плотность вод. На основе сформированного массива плотности определены максимальные значения частоты плавучести и глубины их залегания. Рассчитаны амплитуды вертикальной составляющей скорости первой моды свободных внутренних волн, определены максимальные значения амплитуд и глубины их залегания в Баренцевом и Карском морях.

Выводы. В результате анализа получено, что на рассмотренном временном отрезке средний по морю климатический максимум частоты плавучести имеет тенденцию уменьшения и заглубления как в Баренцевом, так и в Карском море. Наибольшие тренды максимума частоты плавучести отмечаются в теплое полугодие (июнь – ноябрь): положительные – в южной части Баренцева моря в сентябре – ноябре в районе влияния атлантических вод, отрицательные – в июне – августе в районе Земли Франца-Иосифа и Шпицбергена, куда поступают холодные арктические воды и льды из Северного Ледовитого океана. Наибольшие тренды максимума амплитуды вертикальной составляющей скорости внутренних волн отмечаются в холодное полугодие (декабрь – май): положительные – с января по апрель в северных районах Баренцева и Карского морей, отрицательные – в ноябре – январе в южной части Баренцева моря.

Ключевые слова: Баренцево море, Карское море, частота плавучести, внутренние волны, амплитуда вертикальной составляющей скорости, линейный тренд, межгодовая изменчивость

Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0001.

Для цитирования: Букатов А. А., Соловей Н. М., Павленко Е. А. Исследование пространственно-временной изменчивости стратификации плотности и характеристик внутренних волн в Баренцевом и Карском морях // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 1. С. 5–20. EDN JXNZTE.

© Букатов А. А., Соловей Н. М., Павленко Е. А., 2026

Study of Spatial-Temporal Variability in Density Stratification and Characteristics of Internal Waves in the Barents and Kara Seas

A. A. Bukatov, N. M. Solovei , E. A. Pavlenko

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
 nele7@mail.ru

Abstract

Purpose. The work aims to investigate the spatial-temporal variability of vertical structure of density field and characteristics of the internal waves on a climatic scale in the Barents and Kara seas.

Methods and Results. Water density was calculated using the *ORAS5* reanalysis data on monthly average potential temperature and salinity at the ~10-km grid nodes for the period 1958–2022. The resulting array of density data made it possible to determine the maximum values of buoyancy frequency and their depths. The amplitudes of vertical component of the first-mode velocity of free internal waves were calculated, and the amplitude maximum values and their depths were defined for the Barents and Kara seas.

Conclusions. The performed analysis has revealed that during the considered time period, the sea-average climatic maximum of buoyancy frequency had a tendency towards its decrease and deepening both in the Barents and Kara seas. The most manifested trends in the changes of buoyancy frequency maximum are noted in the warm half of a year (June – November): positive trends occur in September – November in the southern Barents Sea where the Atlantic water impact takes place, and negative ones – in June – August in the Franz Josef Land and Svalbard region where there is an inflow of cold Arctic waters and ice from the Arctic Ocean. The most pronounced trends in changes in the maximum amplitude of vertical component of internal wave velocity are observed in the cold half of a year (December – May): positive trends occur in the northern regions of the Barents and Kara seas from January to April, and negative ones – in the southern Barents Sea in November – January.

Keywords: Barents Sea, Kara Sea, buoyancy frequency, internal waves, amplitude of velocity vertical component, linear trend, interannual variability

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2024-0001.

For citation: Bukatov, A.A., Solovei, N.M. and Pavlenko, E.A., 2026. Study of Spatial-Temporal Variability in Density Stratification and Characteristics of Internal Waves in the Barents and Kara Seas. *Physical Oceanography*, 33(1), pp. 3-17.

Введение

Межправительственная группа экспертов по изменению климата в шестом оценочном докладе ¹ пришла к заключению, что неопровержимо установлен факт глобального изменения климата. Анализ современных исследований показывает, что в Арктике изменение климата происходит быстрее, чем в среднем по планете, вследствие эффекта арктического усиления [1]. Это проявляется в сокращении площади ледяного покрова, увеличении аккумуляции тепла в верхнем слое и, как следствие, в изменениях термохалинной структуры вод арктических морей. Продолжение изучения изменчивости вертикальной

¹ Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. The Working Group II contribution to the IPCC Sixth Assessment Report. 2022. URL: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/> (date of access: 22.02.2025).

структуры вод важно не только для понимания текущих процессов, но и для прогноза будущих изменений и адаптации к ним [2–5].

Благодаря своему географическому положению Баренцево море занимает особое место среди окраинных морей Северного Ледовитого океана. Вследствие влияния теплого Северо-Атлантического течения на поверхности моря до 75° с. ш. круглый год наблюдается положительная температура воды. С середины 2000-х гг. в северной и северо-восточной частях Баренцева моря отмечается повышение температуры и солёности [6]. Подобный тренд связывают с уменьшением ледовитости Баренцева моря, что ведет к ослаблению плотностной стратификации, усилению конвективного перемешивания вод и возрастанию поступления тепла и соли из глубин к поверхности моря. Результатом подобных изменений является дальнейшее сокращение площади морского льда, т. е. реализация «положительной обратной связи» [7].

Баренцево и Карское моря разделяет архипелаг Новая Земля. Теплые баренцевоморские воды через проливы Югорский Шар, Карские Ворота, Маточкин Шар поступают в Карское море. Из Центрального Арктического бассейна по желобам Св. Анны и Воронина в Карское море поступают относительно теплые и солёные атлантические воды, которые по мере продвижения с севера на юг трансформируются. Количество и характеристики баренцевоморских и атлантических вод изменяются от года к году [8–11]. Однако основное место в гидрологической структуре Карского моря занимают поверхностные арктические воды и воды, сформированные при смешении с пресными речными. Среднегодовой сток крупнейших арктических рек, впадающих в Карское море (Енисей, Обь), имеет тенденцию увеличения, особенно заметную в последние десятилетия [12, 13]. «Годовой сток рек Сибири и Дальнего Востока в арктические моря России неуклонно растёт с 1980-х гг.» [14, с. 259].

Климатообразующие процессы, которые напрямую или косвенно через цепочку взаимодействий влияют на гидрологический режим арктических морей, приводят к трансформации термохалинной структуры вод. Следствием этого является изменение динамики вод, в частности характеристик волнового движения.

Внутренние волны (ВВ) влияют на перемешивание водных масс, перенос тепла. Понимание современных тенденций динамики ВВ позволит усовершенствовать моделирование климатических изменений, обеспечить безопасную эксплуатацию подводных сооружений, навигацию судов в Арктике [15, 16].

Целью настоящей работы является анализ и оценка климатической изменчивости вертикальной структуры поля плотности и характеристик свободных короткопериодных внутренних волн в Баренцевом и Карском морях.

Материалы и методика

На основе данных реанализа *ORAS5* о среднемесячных значениях потенциальной температуры и солёности в узлах ~ 10 -километровой сетки с неравномерным шагом по глубине до ~ 400 м за период 1958–2022 гг. исследовалась вертикальная структура поля плотности в Баренцевом и Карском морях. Область исследования ограничена параллелями 65° и 80° с. ш. и меридианами 16° и 120° в. д.

Для каждого года рассматриваемого периода в каждом узле сетки рассчитывались среднемесячные профили частоты Вайсяля – Брента (N , цикл/ч) по формуле

$$N^2(z) = \frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz},$$

где z – глубина; g – ускорение свободного падения; ρ – потенциальная плотность.

Определялся максимум частоты Вайсяля – Брента по глубине ($N_{\max}(z)$, цикл/ч) и глубина его залегания ($HN_{\max}(z)$, м).

Исследование климатической изменчивости динамики вод заключалось в изучении тенденции изменчивости амплитуды вертикальной составляющей скорости первой моды свободных ВВ. Система линейных уравнений движения непрерывно стратифицированной жидкости в форме Фьельдстада имеет решение в виде суперпозиции плоских волн [17]. В частности, для вертикальной компоненты скорости $w(x, y, z, t)$ (x, y – горизонтальные координаты, t – время) имеет место представление

$$w(x, y, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \iint_{-\infty}^{\infty} W^{(n)}(k, z) \exp\left\{i\left[k_x x + k_y y - \omega^{(n)}(k)t\right]\right\} dk_x dk_y,$$

где $\omega^{(n)}(k)$ – дисперсионное соотношение (собственная частота) для моды с номером n и волновым числом $k = \left(k_x^2 + k_y^2\right)^{\frac{1}{2}}$; $W^{(n)}(k, z)$ – амплитуда этой моды (собственная функция). Если использовать приближение Буссинеска, отфильтровать поверхностные волны и пренебречь вращением Земли, то $W^{(n)}(k, z)$ будет решением краевой задачи типа Штурма – Лиувилля с нулевыми граничными условиями на дне и свободной поверхности жидкости (условие твердой крышки):

$$d^2 W^{(n)} / dz^2 + \left(\lambda^{(n)} N^2 - k^2\right) W^{(n)} = 0, \quad W^{(n)}(H) = W^{(n)}(0) = 0,$$

где $\lambda^{(n)} = \left(k / \omega^{(n)}\right)^2$ – собственное значение; H – глубина.

Данная спектральная задача состоит в определении собственных значений $\lambda^{(n)}$ и собственных функций $W^{(n)}(k, z)$ для каждой фиксированной длины волны. Для численной реализации краевой задачи по заданному профилю $N(z)$ строилась ее конечно-разностная аппроксимация. Полученная система линейных алгебраических уравнений решалась нахождением корней характеристического уравнения ее матрицы [18].

При выборе интервала длин волн для расчета собственных значений и собственных функций авторы обращались к работам [19–21], из которых следует, что в высоких широтах на радиолокационных изображениях наблюдаются ВВ с длинами 200–3000 м. Первая мода является доминирующей в спектре волнового пакета [22]. В данной работе в качестве иллюстрации представлены расчеты характеристик первой моды свободных ВВ ($W^{(1)}(k, z)$) в безразмерных единицах для длины волны (λ) 1000 м.

Анализ результатов

Для анализа климатической изменчивости максимума частоты плавучести и глубины его залегания временной интервал 1958–2022 гг. был разбит на 2 периода: 1958–1990 и 1991–2022 гг. Всемирная метеорологическая организация рекомендует использовать тридцатилетние средние для климатических расчетов, поскольку такой интервал позволяет охватить полный цикл большинства значимых природных процессов и выявить долговременные тенденции, исключив влияние кратковременных аномалий. Поэтому временной отрезок в 65 лет нами был разбит на два ~ 30-летних цикла, чтобы наглядно проиллюстрировать климатические тенденции изменчивости гидрологических характеристик.

Для каждого из них были найдены среднемноголетние по акваториям морей значения $N_{\max}(z)$ и $HN_{\max}(z)$. Из рис. 1 видно, что средний по морю климатический максимум частоты плавучести имеет тенденцию уменьшения и заглубления как в Баренцевом, так и в Карском море, что хорошо согласуется с выводами, сделанными в работе [23]. Снижение максимума частоты Вьяйсяля – Брента означает ослабление плотностной стратификации и увеличение вертикального движения.

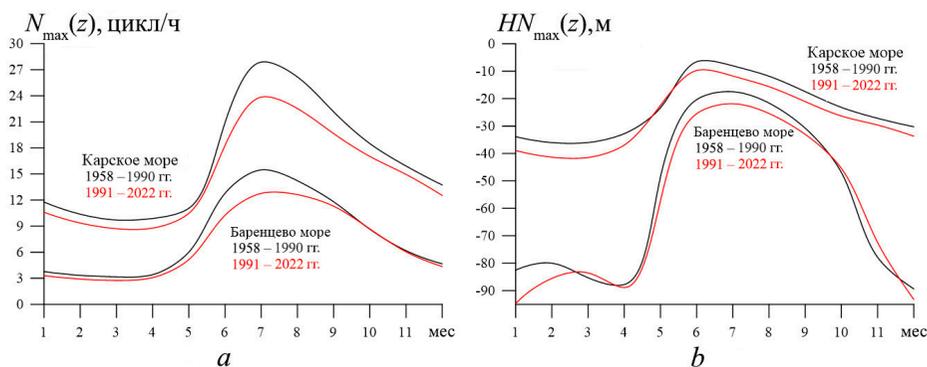
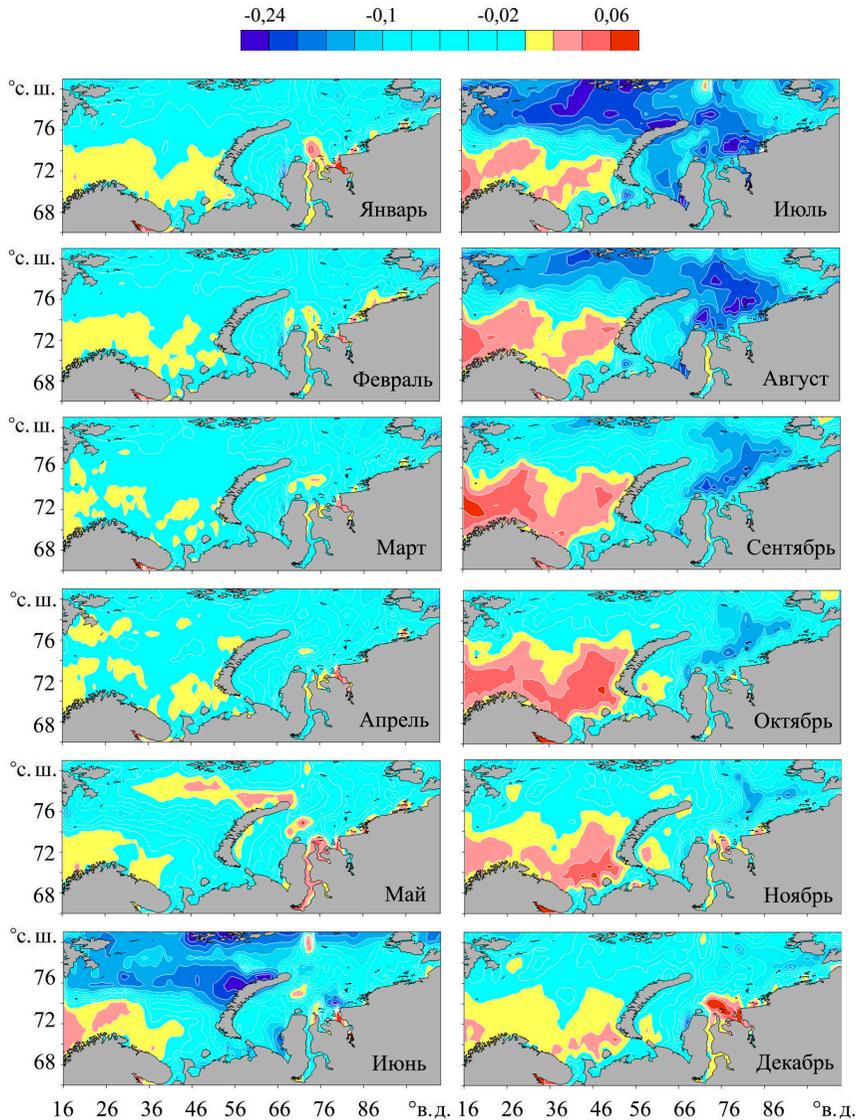


Рис. 1. Среднемноголетние значения максимума частоты Вьяйсяля – Брента (а) и глубины его залегания (б) в Баренцевом и Карском морях

Fig. 1. Annual average values of the Väisälä – Brunt frequency maximum (a) and its depth (b) in the Barents and Kara seas

В изменчивости $N_{\max}(z)$ в Баренцевом и Карском морях прослеживаются региональные особенности (рис. 2), которые в значительной степени определяются поступлением вод из соседних морей. Водообмен с прилегающими морями зависит от глубоководных впадин и проливов, по которым воды поступают в море или выходят из него. Самые широкие и глубокие каналы для проникновения вод в Баренцево море из сопредельных морей – Медвежинский желоб на западе (атлантические воды) и пролив между Землей Франца-Иосифа и Новой Землей на востоке (арктические воды) [24]. Именно в зонах интенсивного водообмена с окружающими морями прослеживается наибольшая изменчивость максимума частоты Вьяйсяля – Брента за период 1958–2022 гг. (рис. 2). Отрицательные тренды $N_{\max}(z)$ на акваториях Баренцева и Карского морей прослеживаются в течение всего года. Максимальные значения коэффициентов линейного тренда достигают $-0,3$ (цикл/ч)/год к юго-западу от Земли Франца-МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 42 № 1 2026

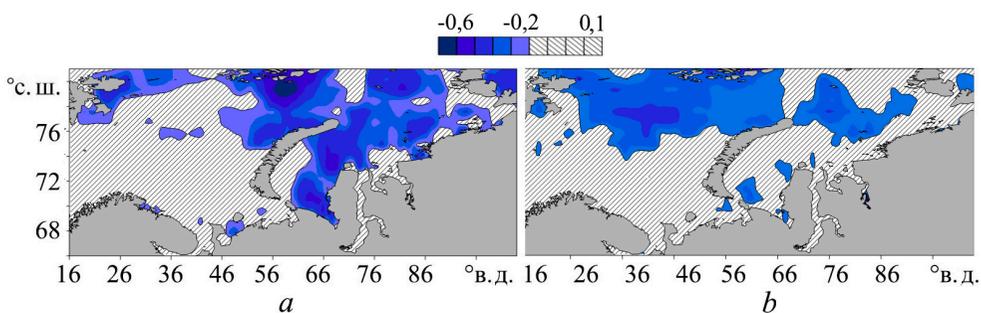
Иосифа и в районе Центральной Карской возвышенности в июле, августе. Положительные тренды $N_{\max}(z)$ отмечаются в теплое полугодие в центральной и южной частях Баренцева моря в зоне влияния Нордкапского течения (рис 2) с максимальным значением коэффициента $\sim 0,06$ (цикл/ч)/год в сентябре в районе Медвежьинского желоба. Положительный климатический тренд $N_{\max}(z)$ в зоне влияния атлантических вод, возможно, связан с ослаблением Нордкапского течения, так как именно теплые и соленые воды этого течения приводят к сглаживанию разницы в плотности слоев по глубине в этом районе Баренцева моря [25].



Р и с. 2. Пространственное распределение коэффициентов линейных трендов $N_{\max}(z)$ ((цикл/ч)/год) в Баренцевом и Карском морях (1958–2022 гг.)

Fig. 2. Spatial distribution of the coefficients of linear trends $N_{\max}(z)$ ((cycle/hour)/year) in the Barents and Kara seas (1958–2022)

Для оценки влияния глобальных климатических процессов на стратификацию арктических морей исследовалась связь максимума частоты плавучести с индексами атмосферной циркуляции *NAO* (северное арктическое колебание)², *AO* (арктическое колебание)³, *GSNW* (северная стена Гольфстрима). Для каждого месяца периода 1958–2022 гг. в каждом узле сетки рассчитывался коэффициент корреляции между $N_{\max}(z)$ и *NAO*, *AO*, *GSNW*. Анализ результатов показал, что значимая корреляционная связь (доверительный интервал 95 %) прослеживается между $N_{\max}(z)$ и *AO*, $N_{\max}(z)$ и *GSNW* в августе (рис. 3). Значимые коэффициенты корреляции (*R*) отрицательные и локализованы в областях максимальных отрицательных линейных трендов $N_{\max}(z)$ (рис. 2).



Р и с. 3. Пространственное распределение коэффициентов корреляции между $N_{\max}(z)$ и *AO* (a), $N_{\max}(z)$ и *GSNW* (b) в августе (1958–2022 гг.)

F i g. 3. Spatial distribution of correlation coefficients between $N_{\max}(z)$ and *AO* (a), and $N_{\max}(z)$ and *GSNW* (b) in August (1958–2022)

Индекс арктического колебания косвенно характеризует зависимость гидрологии арктических морей от проникновения теплых атлантических вод. Во время положительной фазы *AO* центральная часть Арктики занята областью пониженного давления, что способствует притоку атлантических вод. Во время отрицательной фазы *AO* над Арктикой находится область повышенного давления, что уменьшает поступление атлантических вод⁴. Отрицательные *R* между $N_{\max}(z)$ и *AO* в области отрицательных трендов максимума частоты плавучести позволяют предположить, что увеличение притока атлантической воды в Баренцево и Карское моря приводит к уменьшению $N_{\max}(z)$ и, наоборот, уменьшение поступления атлантических вод способствует увеличению $N_{\max}(z)$.

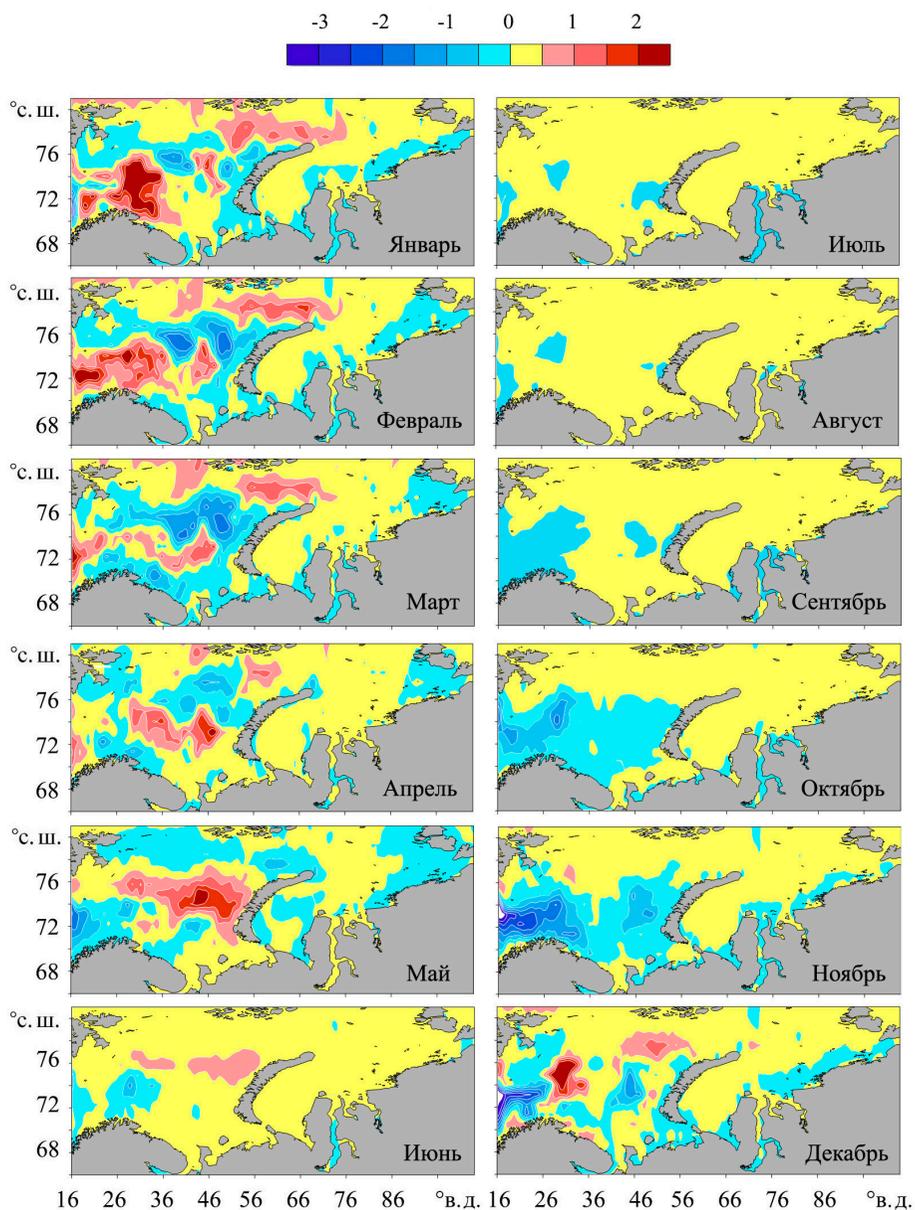
Значения *GSNW* характеризуют положение северной стены Гольфстрима – фронта теплых вод в Атлантическом океане. Чем больше значения индекса, тем дальше на север продвигается течение [26–28]. Отрицательные значимые коэффициенты корреляции между $N_{\max}(z)$ и *GSNW* в августе в области отрицательных трендов максимума частоты плавучести могут свидетельствовать о том, что увеличение интенсивности Гольфстрима является причиной уменьшения $N_{\max}(z)$ и, наоборот, ослабление течения приводит к росту $N_{\max}(z)$.

² <https://www.firenzemeteo.it/en/teleconnections/nao-north-atlantic-oscillation-index.php> (дата обращения: 22.02.2025)

³ <https://www.firenzemeteo.it/en/teleconnections/ao-arctic-oscillation-index.php> (дата обращения: 22.02.2025)

⁴ Климатология / О. А. Дроздов [и др.]. Ленинград : Гидрометеоздат, 1989. 568 с.

Значимой корреляционной связи между $N_{\max}(z)$ и NAO не выявлено.



Р и с. 4. Пространственное распределение коэффициентов линейных трендов $HN_{\max}(z)$ (м/год) в Баренцевом и Карском морях (1958–2022 гг.)

F i g. 4. Spatial distribution of the coefficients of linear trends $HN_{\max}(z)$ (m/year) in the Barents and Kara seas (1958–2022)

Пространственное распределение коэффициентов линейных трендов глубины залегания максимальных значений частоты Вьяйсяля – Брента в Баренцевом и Карском морях иллюстрирует рис. 4. Видно, что в июле, августе практически на всей акватории морей значения линейного тренда $HN_{\max}(z)$ близки

к нулю. С декабря по июнь в Карском море в зоне влияния стока рек Обь и Енисей отмечаются отрицательные тренды. Значения коэффициентов не превышают $-0,5$ м/год. С сентября по ноябрь в западной, центральной и восточной частях Баренцева моря преобладают тенденции уменьшения $HN_{\max}(z)$. Наибольшего значения ($\sim -3,5$ м/год) коэффициенты линейных трендов достигают в районе Медвежинского желоба в ноябре. С декабря по июнь наблюдаются как положительные, так и отрицательные тренды. Коэффициенты максимальных положительных трендов не превышают 2 м/год.

Анализ связи тенденций изменения максимума частоты Вьяйсяля – Брента и глубины его залегания показал, что в целом эти величины на временном промежутке 1958–2022 гг. изменяются в противофазе. В областях, где прослеживается тенденция увеличения $N_{\max}(z)$, тренд $HN_{\max}(z)$ отрицательный, и, наоборот, там, где $N_{\max}(z)$ уменьшается, $HN_{\max}(z)$ увеличивается (рис. 2, 4). Утверждение о том, что эти две величины изменяются в противофазе, означает, что увеличение $N_{\max}(z)$ соответствует перемещению глубины залегания максимальных градиентов плотности ближе к поверхности, уменьшение $N_{\max}(z)$ сопровождается ее заглублением. Исключением являются январь и февраль, когда значение R близко к нулю. Коэффициент корреляции между линейными трендами $N_{\max}(z)$ и $HN_{\max}(z)$ достигает максимальных значений (R_{\max}) $-0,62$ (Баренцево море) и $-0,38$ (Карское море) в августе (рис. 5). Средний коэффициент корреляции (R_{cp}) по Баренцеву морю $\sim -0,33$, по Карскому $\sim -0,21$. Рассчитанные коэффициенты корреляции являются значимыми⁵.

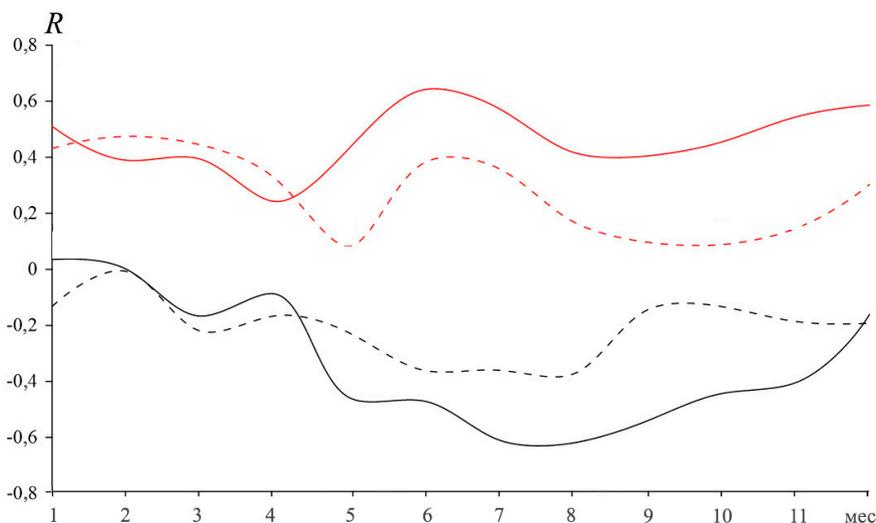


Рис. 5. R между коэффициентами линейных трендов: $N_{\max}(z)$ и $HN_{\max}(z)$ (черные линии), $W_{\max}^{(1)}(z)$ и $HW_{\max}^{(1)}(z)$ (красные линии). Сплошная линия – Баренцево море, штриховая – Карское (1958–2022 гг.)

Fig. 5. R between the coefficients of linear trends: $N_{\max}(z)$ and $HN_{\max}(z)$ (black lines), and $W_{\max}^{(1)}(z)$ and $HW_{\max}^{(1)}(z)$ (red lines). Solid line shows the Barents Sea, and dashed one – the Kara Sea (1958–2022)

⁵ Брукс К., Карузертс Н. Применение статистических методов в метеорологии. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1963. 416 с.

Долговременные изменения гидрологической структуры вод неизбежно приводят к изменению динамических характеристик ВВ. Средний по морю климатический максимум амплитуды вертикальной составляющей скорости первой моды ВВ ($W_{\max}^{(1)}(z)_{\text{ср}}$) имеет тенденцию увеличения как в Баренцевом, так и в Карском море в холодное полугодие (рис. 6, а). Так, с января по май превышение величин $W_{\max}^{(1)}(z)_{\text{ср}}$, осредненных за 1958–1990 гг., по сравнению с величинами, осредненными за 1991–2022 гг., достигает ~ 25 % (рис 6, а). В эти же месяцы есть тренд заглубления $W_{\max}^{(1)}(z)_{\text{ср}}$, однако в остальные месяцы он меньше либо равен нулю (рис 6, б).

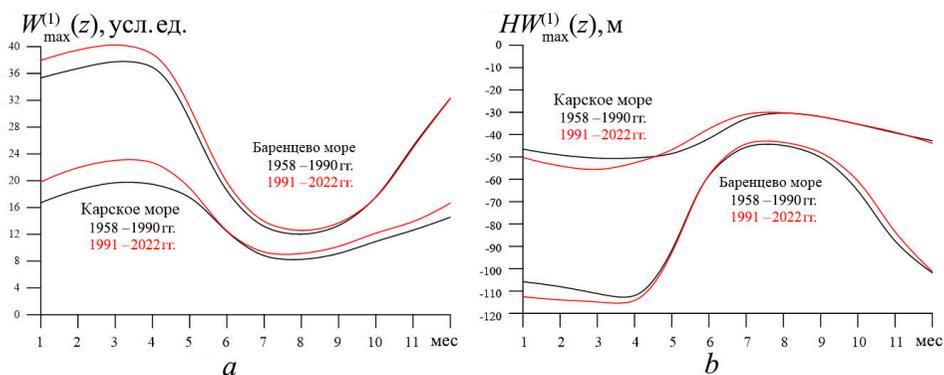
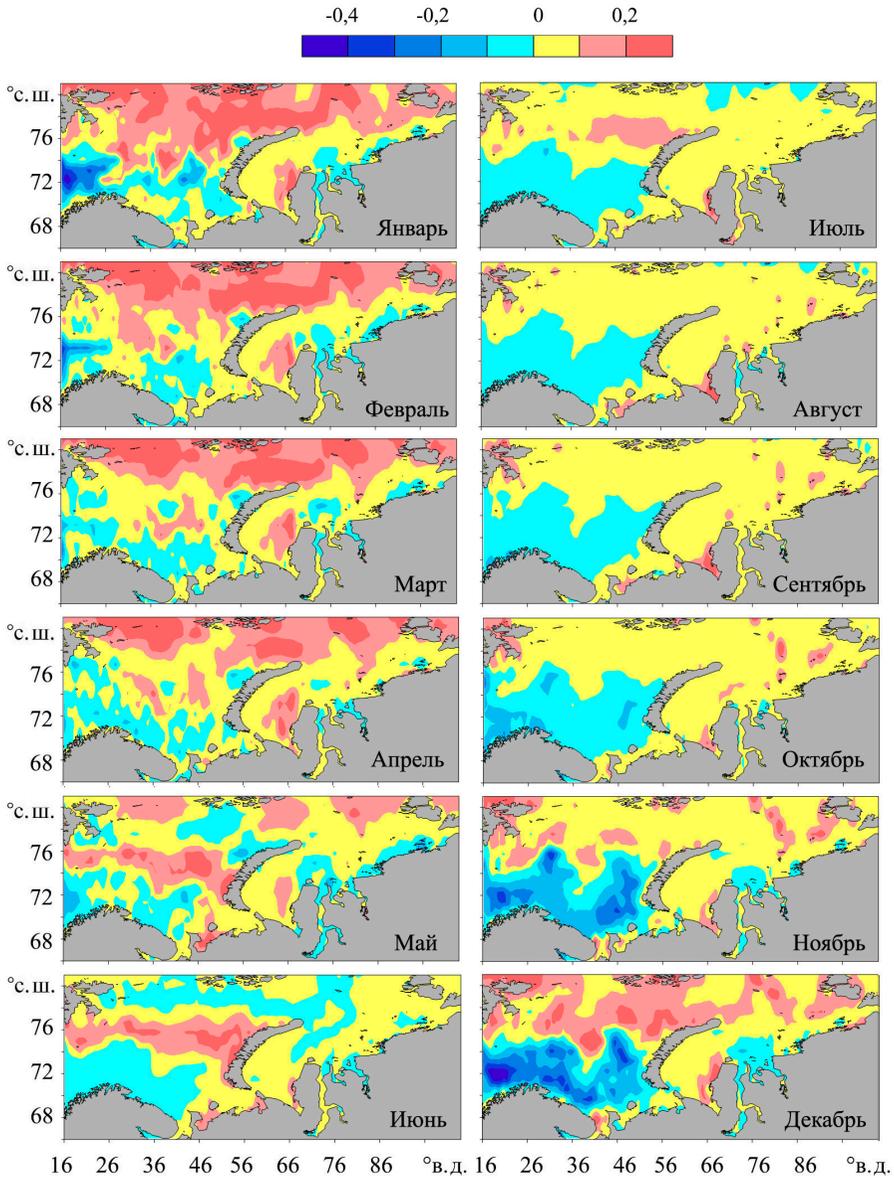


Рис. 6. Среднегодовое значения $W_{\max}^{(1)}(z)$ (а) и $HW_{\max}^{(1)}(z)$ (б) в Баренцевом и Карском морях
Fig. 6. Annual average values of $W_{\max}^{(1)}(z)$ (a) and $HW_{\max}^{(1)}(z)$ (b) in the Barents and Kara seas

С декабря по апрель в северных районах Баренцева и Карского морей отмечаются положительные тренды $W_{\max}^{(1)}(z)$ (рис. 7). В мае – июле положительные тренды локализируются в центральной части Баренцева моря в районе между возвышенностями Персея и Центральной. Отрицательные тренды $W_{\max}^{(1)}(z)$ отмечаются в течение всего года в зоне влияния атлантических вод. Наибольшие значения отрицательных коэффициентов линейного тренда $W_{\max}^{(1)}(z)$ не превышают $-0,5$ усл. ед./год в декабре в районе Медвежинского желоба (рис. 7).

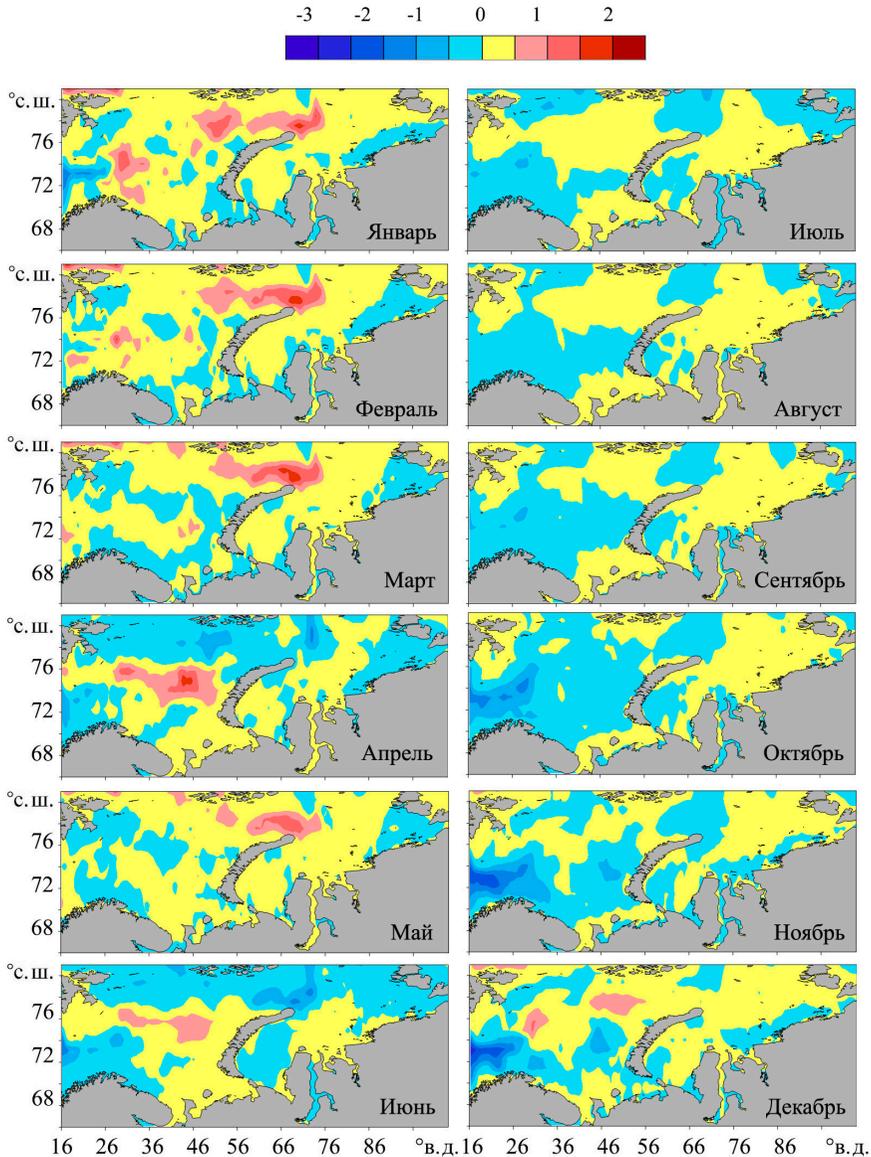
Анализируя географическое распределение коэффициентов линейных трендов $HW_{\max}^{(1)}(z)$ (рис. 8), отметим, что с мая по ноябрь прослеживаются тенденции уменьшения $HW_{\max}^{(1)}(z)$ на значительной части акватории морей (север и юг Баренцева моря, север Карского моря). Наибольшие значения коэффициентов линейного тренда $HW_{\max}^{(1)}(z)$ не превышают -2 м/год в ноябре в районе Медвежинского желоба. С декабря по апрель множество небольших областей с положительными и отрицательными трендами расположены по всей акватории, где значения трендов $HW_{\max}^{(1)}(z)$ малы. Коэффициенты отрицательных трендов в это время не превышают $-0,5$ м/год, положительных -2 м/год.



Р и с. 7. Пространственное распределение коэффициентов линейных трендов $W_{\max}^{(1)}(z)$ (усл. ед./год) в Баренцевом и Карском морях (1958–2022 гг.)

Fig. 7. Spatial distribution of the coefficients of linear trends $W_{\max}^{(1)}(z)$ (conv. units/year) in the Barents and Kara seas (1958–2022)

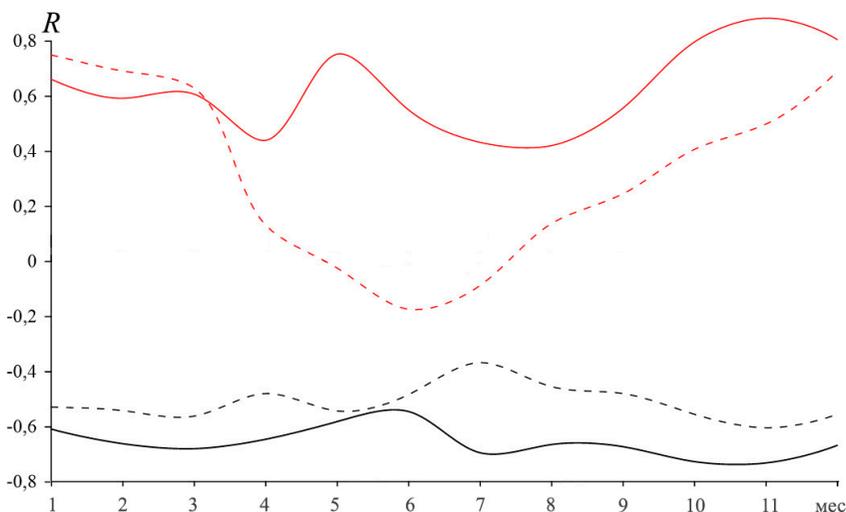
Коэффициенты корреляции между трендами $W_{\max}^{(1)}(z)$ и $HW_{\max}^{(1)}$ положительные (рис. 5): их среднее значение $\sim 0,47$ в Баренцевом море и $\sim 0,28$ – в Карском. Это значит, что тенденции изменчивости $W_{\max}^{(1)}(z)$ и $HW_{\max}^{(1)}(z)$ совпадают. Отметим, что R_{\max} между трендами $W_{\max}^{(1)}(z)$ и $HW_{\max}^{(1)}(z)$ составляет в Баренцевом море $\sim 0,64$ в июне, в Карском $\sim 0,47$ в феврале.



Р и с. 8. Пространственное распределение коэффициентов линейных трендов $HW_{\max}^{(1)}(z)$ (м/год) в Баренцевом и Карском морях (1958–2022 гг.)

F i g. 8. Spatial distribution of the coefficients of linear trends $HW_{\max}^{(1)}(z)$ (m/year) in the Barents and Kara seas (1958–2022)

Тенденции изменчивости максимума частоты плавучести и амплитуды вертикальной составляющей скорости первой моды ВВ имеют $R_{\text{ср}} \sim -0,66$ в Баренцевом море и $R_{\text{ср}} \sim -0,51$ в Карском, что свидетельствует о значимой связи этих характеристик (рис. 9). Максимальных значений коэффициенты корреляции между $N_{\max}(z)$ и $W_{\max}^{(1)}(z)$ достигают в ноябре: в Баренцевом море $R_{\max} \sim -0,73$, в Карском $R_{\max} \sim -0,6$.



Р и с. 9. R между коэффициентами линейных трендов: $N_{\max}(z)$ и $W_{\max}^{(1)}(z)$ (черные линии), $HN_{\max}(z)$ и $HW_{\max}^{(1)}(z)$ (красные линии). Сплошная линия – Баренцево море, штриховая – Карское (1958–2022 гг.)

Fig. 9. R between the coefficients of linear trends: $N_{\max}(z)$ and $W_{\max}^{(1)}(z)$ (black lines), $HN_{\max}(z)$ and $HW_{\max}^{(1)}(z)$ (red lines). Solid line shows the Barents Sea, and dashed one – the Kara Sea (1958–2022)

Связь между трендами $HN_{\max}(z)$ и $HW_{\max}^{(1)}(z)$ в Баренцевом и Карском морях имеет существенные отличия (рис 9). В Баренцевом море коэффициенты корреляции между $HN_{\max}(z)$ и $HW_{\max}^{(1)}(z)$ положительные в течение всего года, $R_{\max} \sim 0,88$ в ноябре. В Карском море с апреля по август коэффициенты корреляции отрицательные или близки к нулю, $R_{\max} \sim 0,75$ в январе.

Заключение

В работе на основе данных реанализа *ORAS5* проведено исследование пространственно-временной изменчивости гидрофизических характеристик вод в Баренцевом и Карском морях на климатическом масштабе.

Атлантическая вода в Северном Ледовитом океане и арктических морях – это слой воды с положительной температурой в диапазоне глубин 150–900 м. Влияние атлантической воды на ледяной покров ослабляется ее изоляцией от поверхности океана промежуточным высокоградиентным слоем (галоклином), затрудняющим вертикальный перенос тепла. Это справедливо для большей части Арктического бассейна, за исключением областей, где верхняя граница атлантической воды расположена близко к поверхности. Максимум частоты Вайсяля – Брента и глубина его залегания характеризуют мощность и глубину высокоградиентного слоя, ослабляющего воздействие атлантической воды на лед. Представление о тенденции развития слоя максимальных градиентов плотности имеет важное значение для прогнозирования воздействия теплой атлантической воды на ледяной покров арктических морей и Северного Ледовитого океана.

Изменение вертикальной структуры поля плотности приводит к трансформации свойств внутренних волн, которые играют важную роль в динамике океанов и морей. Внутренние волны оказывают влияние на процессы энергообмена, способствуют перемешиванию вод, которое необходимо для жизни морских организмов. Информация о пространственно-временной изменчивости характеристик ВВ в арктических морях может быть использована для планирования схемы вылова биоресурса в промысловых районах. Это основывается на известных выводах о зависимости между плотностью биомассы планктона и высотой ВВ, которая пропорционально зависит от амплитуды вертикальной составляющей скорости ВВ.

В результате проведенных исследований получено, что на временном отрезке 1958–2022 гг. средний по морю климатический максимум частоты плавучести имеет тенденцию уменьшения и заглубления как в Баренцевом, так и в Карском море.

Наибольшие положительные тренды максимума частоты Вьясяля – Брента отмечаются в южной части Баренцева моря в июне – ноябре, наибольшие отрицательные – в июне – августе в районе Земли Франца-Иосифа, Шпицбергена и Центральной Карской возвышенности.

С декабря по июнь в центральной части Баренцева моря положительные тренды глубины залегания максимума частоты плавучести перемежаются с отрицательными, а в июле, августе они близки к нулю на всей акватории моря. С сентября по ноябрь в западной и центральной частях Баренцева моря преобладают тенденции уменьшения глубины залегания слоя максимальных градиентов плотности. В Карском море в зоне влияния стока рек Обь и Енисей с декабря по июнь отмечаются отрицательные тренды глубины залегания максимума частоты Вьясяля – Брента. В остальные месяцы климатическая изменчивость глубины залегания слоя максимальных градиентов плотности близка к нулю.

Показано, что средний по морю климатический максимум амплитуды вертикальной составляющей скорости первой моды ВВ имеет тенденцию увеличения и заглубления как в Баренцевом, так и в Карском море в холодное полугодие. Наибольшие положительные тренды максимума амплитуды вертикальной составляющей скорости первой моды ВВ отмечаются с декабря по апрель в северных районах Баренцева и Карского морей. Наибольшие отрицательные – с ноября по январь в южной части Баренцева моря.

С мая по ноябрь преобладают тенденции уменьшения глубины залегания максимума амплитуды вертикальной составляющей скорости первой моды ВВ на значительной части акватории морей (север и юг Баренцева моря, север и восток Карского). В остальные месяцы на акватории Баренцева моря отмечаются как положительные, так и отрицательные тренды, в Карском море климатическая изменчивость глубины залегания максимальных значений вертикальной составляющей скорости первой моды ВВ практически отсутствует.

Максимумы частоты плавучести и амплитуды вертикальной составляющей скорости первой моды внутренних волн изменяются в противофазе как в Баренцевом, так и в Карском море. Соответствия между климатической изменчивостью глубин залегания максимума частоты плавучести и амплитуды

вертикальной составляющей скорости первой моды внутренних волн в Баренцевом и Карском морях заметно отличаются: в Баренцевом море коэффициенты корреляции положительные в течение всего года, а в Карском море с апреля по август они отрицательные или близки к нулю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Латонин М. М., Башимачников И. Л., Бобылёв Л. П.* Явление арктического усиления и его движущие механизмы // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13, № 3. С. 3–19. <https://doi.org/10.7868/S2073667320030016>
2. Климатические изменения в Арктике и Северной Полярной области / Г. В. Алексеев [и др.] // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2010. № 1. С. 67–80. EDN MSMHPP.
3. Изменения климата Арктики и Антарктики – результат действия естественных причин / И. Е. Фролов [и др.] // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2010. № 2. С. 52–61. EDN NAVNSJ.
4. Климатическая изменчивость ледяных массивов Карского моря / В. П. Карклин [и др.] // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2017. № 4. С. 37–46. EDN ZXPAZV.
5. *Алексеев Г. В., Данилов А. И., Смоляницкий В. М.* Летнее сокращение морских льдов в Арктике в 2012 г. // *Российские полярные исследования*. 2012. № 3. С. 11–13. EDN PQJCKJ.
6. *Lind S., Ingvaldsen R. B., Furevik T.* Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import // *Nature Climate Change*. 2018. Vol. 8, iss. 7. P. 634–639. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0205-y>
7. Изменение гидрологических условий в Баренцевом море как индикатор климатических трендов в евразийской Арктике в XXI веке / В. В. Иванов [и др.] // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2022. № 1. С. 13–25. EDN TKYDXO.
8. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость / В. К. Ожигин [и др.]. Мурманск : Полярный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н. М. Книповича, 2016. 260 с. EDN WQEAPR.
9. *Букатов А. А., Павленко Е. А., Соловей Н. М.* Особенности пространственно-временной изменчивости частоты Вьясяля – Брента в Баренцевом и Карском морях // *Процессы в геосредах*. 2018. № 3. С. 1004–1013. EDN YPOVXN.
10. *Коник А. А., Зимин А. В., Атаджанова О. А.* Количественные оценки изменчивости характеристик температуры поверхности моря в районе фронтальных зон Карского моря // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 1. С. 54–61. EDN TXLIBC. <https://doi.org/10.7868/S2073667319010076>
11. Поверхностные и внутренние волны в арктических морях / Под ред. И. В. Лавренова, Е. Г. Морозова. Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 2002. 362 с.
12. *Shiklomanov I. A., Shiklomanov A. I.* Climatic Change and the Dynamics of River Runoff into the Arctic Ocean // *Water Resources*. 2003. Vol. 30, iss. 6. P. 593–601. EDN LIGAAAT. <https://doi.org/10.1023/B:WARE.0000007584.73692.ca>
13. *Bukatov A. A., Pavlenko E. A., Solovei N. M.* River Runoff Influence on the Density Stratification of the Russian Arctic Seas // *Processes in GeoMedia. – Volume VI / Ed. T. Chaplina*. Cham : Springer, 2023. P. 523–536. (Book Series Springer Geology, vol. 4). EDN HMXRFR. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16575-7_47
14. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений / Н. Л. Фролова [и др.] // *Водные ресурсы*. 2022. Т. 49, № 3. С. 251–269. EDN YBZDRN. <https://doi.org/10.31857/S032105962203004X>
15. *Букатов А. А., Соловей Н. М., Павленко Е. А.* Оценка связи дисперсионных свойств свободных внутренних волн и вертикальной структуры поля плотности в Баренцевом и Карском морях // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 1. С. 20–30. EDN SBCHJI. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-1-20-30>

16. *Букатов А. А., Соловей Н. М., Павленко Е. А.* Региональные особенности плотностной стратификации вод и характеристик внутренних волн в арктических морях // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 6. С. 779–796. EDN WVSP0B.
17. *Мирополюский Ю. З.* Динамика внутренних гравитационных волн в океане. Ленинград : Гидрометеониздат, 1981. 302 с.
18. *Грищенко В. А., Красицкий В. П.* Об одном способе расчета дисперсионных соотношений и собственных функций внутренних волн в океане по данным натурных измерений // Океанология. 1982. Т. XXII, вып. 4. С. 545–549.
19. *Козлов И. Е., Кудрявцев В. Н., Сандвен С.* Некоторые результаты исследования внутренних волн в Баренцевом море методами радиолокационного зондирования из космоса // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 3. С. 60–69. EDN NDLAFR.
20. Короткопериодные внутренние волны в Белом море: оперативный подспутниковый эксперимент летом 2012 г. / А. В. Зимин [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2014. № 3. С. 41–55. EDN SDXHBR. <https://doi.org/10.7868/S0205961414030087>
21. Характеристики поля короткопериодных внутренних волн в Карском море по данным спутниковых радиолокационных измерений / И. Е. Козлов [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2015. № 4. С. 44–59. EDN UDEYRL. <https://doi.org/10.7868/S0205961415040053>
22. Трансформация бризера внутренних волн первой моды над вертикальным уступом в трехслойной жидкости / П. В. Лобовиков [и др.] // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55, № 6. С. 182–193. EDN JRYIMF. <https://doi.org/10.31857/S0002-3515556182-193>
23. Моря российской Арктики в современных климатических условиях / Под ред. И. М. Ашика. Санкт-Петербург : ААНИИ, 2021. 359 с.
24. Система Баренцева моря / А. П. Лисицын [и др.]. Москва : ООО «Издательство ГЕОС», 2021. 672 с. EDN NXXCXU. <https://doi.org/10.29006/978-5-6045110-0-8>
25. *Тимофеев В. Т.* Устойчивость вод Баренцева моря // Проблемы Арктики. 1944. Вып. 3. С. 5–37.
26. *Карлин Л. Н., Малинин В. Н., Гордеева С. М.* Изменчивость гидрофизических характеристик в Гольфстриме // Океанология. 2013. Т. 53, № 4. С. 454–462. EDN QMFYTN. <https://doi.org/10.7868/S0030157413040047>
27. *Bryden H. L., Longworth H. R., Cunningham S. A.* Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25° N // Nature. 2005. Vol. 438. P. 655–657. <https://doi.org/10.1038/nature04385>
28. *Букатов А. Е., Букатов А. А., Бабий М. В.* Отклик воздействия внутренних и внешних факторов в широтном смещении кромки морского льда в арктическом бассейне // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 6. С. 28–36. EDN XGXULB. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-6-28-36>

Об авторах:

Букатов Антон Алексеевич, заведующий отделом океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1165-8428**, **ResearcherID: P-6733-2017**, **SPIN-код: 7790-4651**, newisland@list.ru

Соловей Неля Михайловна, младший научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0003-3359-0345**, **SPIN-код: 4078-4270**, nele7@mail.ru

Павленко Екатерина Анатольевна, младший научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0001-9146-5708**, **SPIN-код: 3047-6419**, pavlenko.ca@mhi-ras.ru