

Оценка связи дисперсионных свойств свободных внутренних волн и вертикальной структуры поля плотности в Баренцевом и Карском морях

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

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: ne.le.7@hotmail.com*

Поступила в редакцию 04.06.2019 г.

Цель. Целью работы является исследование пространственно-временных зависимостей дисперсионных свойств короткопериодных свободных внутренних волн от вертикальной структуры поля плотности в Баренцевом и Карском морях.

Методы и результаты. На основе линеаризованных уравнений движения идеальной несжимаемой непрерывно стратифицированной жидкости исследованы дисперсионные свойства свободных внутренних волн в Баренцевом и Карском морях. В результате решения основной краевой задачи типа Штурма – Лиувилля рассчитаны собственные частоты пяти низших мод и собственный период первой моды внутренних волн. Для расчета поля плотности использовались данные реанализа *World Ocean Atlas 2013* о температуре и солености с 1955 по 2012 гг. с разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Выполнен анализ связи дисперсионных свойств свободных внутренних волн и вертикальной структуры поля плотности, проведено сравнение дисперсионных характеристик внутренних волн в Баренцевом и Карском морях.

Выводы. В месяцы максимальных градиентов плотности наблюдаются самые высокочастотные и самые короткопериодные внутренние волны. Во внутритродовом цикле максимум осредненной частоты плавучести по глубине в Баренцевом море достигает наибольших значений в июле и августе ($\approx 0,02 \text{ с}^{-1}$), в Карском море – с июля по сентябрь ($\approx 0,055 \text{ с}^{-1}$) и в ноябре ($\approx 0,058 \text{ с}^{-1}$). В эти же месяцы отмечаются максимальные значения осредненных собственных частот и минимальные значения осредненного собственного периода внутренних волн. Так, для длины волны 1000 м наибольшая осредненная собственная частота первой моды и наименьший осредненный собственный период первой моды в Баренцевом море составляют $0,0025 \text{ с}^{-1}$ и 45 мин, в Карском море – $0,0038 \text{ с}^{-1}$ и 30 мин соответственно.

Ключевые слова: Баренцево море, Карское море, частота Вяйсяля – Брента, внутренние волны, дисперсионные соотношения, собственная частота, собственный период.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2019-0003.

Для цитирования: 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. doi:10.22449/0233-7584-2020-1-20-30

Estimation of the Relation between the Dispersion Features of Free Internal Waves and the Density Field Vertical Structure in the Barents and Kara Seas

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

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

**e-mail: ne.le.7@hotmail.com*

Purpose. The aim of the paper is to investigate spatial-temporal dependences of the dispersion features of short-period free internal waves on the density field vertical structure in the Barents and Kara seas.

Methods and Results. Based on the linearized equations of motion of the ideal incompressible and continuously stratified fluid, the dispersion features of free internal waves in the Barents and Kara seas were studied. Solution of the main boundary problem of the Sturm-Liouville type made it possible to obtain the own frequencies of five lowest modes and the own period of the internal waves' first mode. To calculate the density field, the World Ocean Atlas 2013 reanalysis data on temperature and salinity for 1955–2012 with resolution $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ were applied. The relation between the dispersion features of free internal waves and the density field vertical structure was analyzed, and dispersion characteristics of the internal waves in the Barents and Kara seas were compared.

Conclusions. During the months when the density gradients are maximal, the internal waves of the highest frequency and the shortest period are observed. Among the intra-year maximums of the buoyancy depth-averaged frequency, the highest values ($\approx 0.02 \text{ s}^{-1}$) are observed in the Barents Sea in July and August, and those of the Kara Sea – in July–September ($\approx 0.055 \text{ s}^{-1}$) and in November ($\approx 0.058 \text{ s}^{-1}$). In the same months, noted are the maximum values of the averaged natural frequencies and the minimum values of the averaged own period of the internal waves. Thus, for the wavelength 1000 m, the highest averaged own frequency and the smallest averaged own period of the first mode in the Barents Sea constitute 0.0025 s^{-1} and 45 min., and those in the Kara Sea – 0.0038 s^{-1} and 30 min, respectively.

Keywords: Barents Sea, Kara Sea, Väisälä-Brunt frequency, internal waves, dispersion relations, own frequency, own period.

Acknowledgements: the investigation is carried out within the framework of the state task on theme No. 0827-2019-0003.

For citation: Bukatov, A.A., Solovei, N.M. and Pavlenko, E.A., 2020. Estimation of the Relation between the Dispersion Features of Free Internal Waves and the Density Field Vertical Structure in the Barents and Kara Seas. *Physical Oceanography*, [e-journal] 27(1), pp.18-27. doi:10.22449/1573-160X-2020-1-18-27

Введение

Волновые движения морской воды наблюдаются во всей толще Мирового океана и играют важную роль в океанических процессах. Внутренние волны (ВВ) проявляются в изменениях температуры и солёности воды, оказывают влияние на турбулентное перемешивание, вертикальные миграции планктона и рыб, условия распространения звука в океане и т. д. [1–3].

Различают высокочастотные и низкочастотные внутренние волны [4]. Длины высокочастотных внутренних волн лежат в пределах от нескольких метров до нескольких километров, а низкочастотных – от нескольких десятков до нескольких сотен километров. Энергетический спектр низкочастотных внутренних волн имеет выраженный максимум на инерционной (период от 12 до нескольких десятков часов) и приливных (периоды ≈ 12 и 24 ч) частотах [5, 6]. Свободные внутренние волны, сгенерированные приливами, рас-

пространяются в толще океана. Однако широта, близкая к $74,5^\circ$, является критической для полусуточных приливных внутренних волн, и севернее этой широты они не могут существовать в Арктическом бассейне в виде свободных волн. Считается, что в области сверхкритических (высоких) широт внутренняя волна полусуточного периода по мере окончания действия вынуждающей силы разрушается, генерируя пакет короткопериодных (высокочастотных) волн, для которых нет запрета на существование в полярных широтах [1; 7, с. 709–710].

В настоящей работе исследованы дисперсионные свойства свободных короткопериодных внутренних волн в Баренцевом и Карском морях.

Материалы и методика

Для расчета среднемесячных значений плотности использовались данные реанализа *World Ocean Atlas 2013* о температуре и солёности с 1955 по 2012 гг. в узлах сетки $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ с шагом 5 м по глубине до горизонта 100 м и шагом 25 м – до горизонта 150 м [8, 9]. Область исследования: 16° – 105° в. д. и 66° – 82° с. ш. Полученные массивы плотности проверялись на наличие инверсий и в случае необходимости корректировались путем замены инверсионных величин значениями, интерполированными по соседним горизонтам [10]. Далее рассчитывались профили частоты плавучести $N(z)$, определялся максимум частоты Вьяйсяля – Брента по глубине ($N_{\max}(z)$).

Исследование внутренних волн выполнено на основе линеаризованных уравнений движения идеальной несжимаемой непрерывно стратифицированной жидкости. В приближении Буссинеска, пренебрегая вращением Земли, для определения вертикальной компоненты скорости $W^{(n)}(z)$ получаем основную краевую задачу типа Штурма – Лиувилля [11]

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

с граничными условиями на дне и свободной поверхности

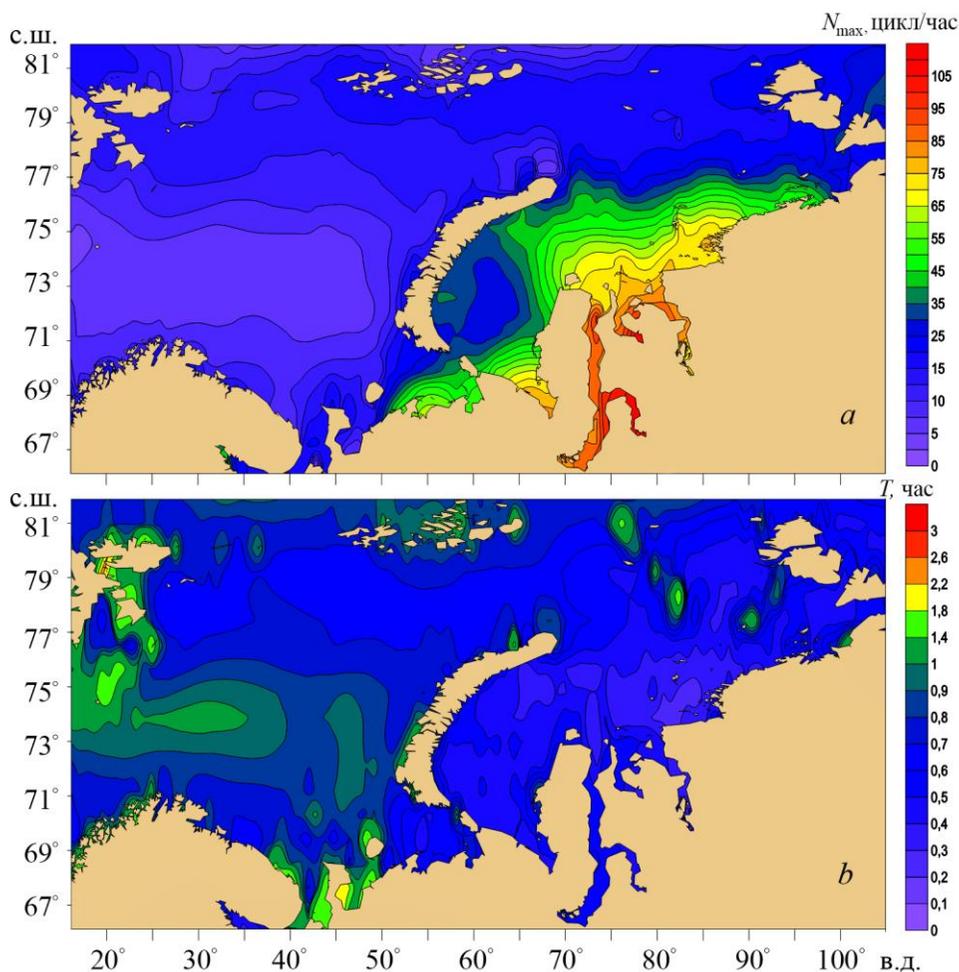
$$W^{(n)}(H) = W^{(n)}(0) = 0.$$

Здесь $\lambda^{(n)} = \left(\frac{k}{\omega^{(n)}} \right)^2$; $\omega^{(n)}$ – собственная частота; k – волновое число; H – глубина.

Для численного решения основной краевой задачи по заданному профилю $N(z)$ строилась ее конечно-разностная аппроксимация. Полученная система линейных алгебраических уравнений решалась методом, основанным на решении характеристического уравнения для ее матрицы [11; 12, с. 545]. Рассчитывались собственные частоты $\omega^{(n)}$ пяти низших мод и собственный период T первой моды для волн длиной 400–1500 м с шагом 50 м. Существование в арктических морях свободных ВВ в этом диапазоне длин подтверждается радиолокационным зондированием из космоса [13].

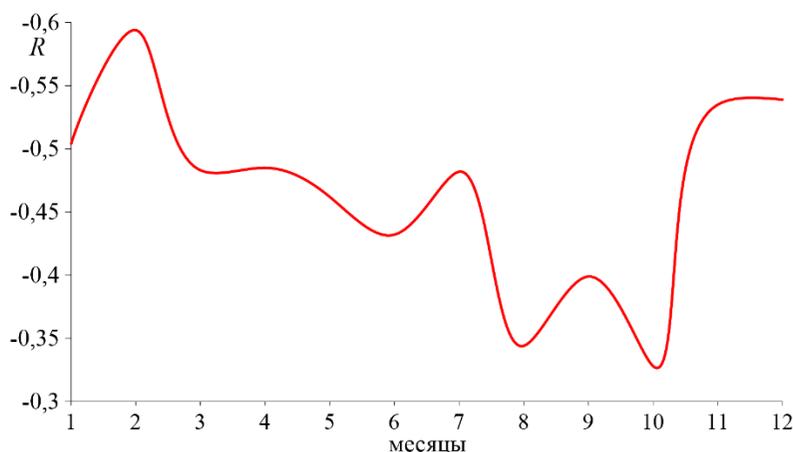
Анализ результатов

Географическое положение Баренцева и Карского морей, особенности их гидрологического режима определяют плотностную стратификацию вод и дисперсию свободных внутренних волн. Показателем, характеризующим стратификацию водной толщи, является частота плавучести (частота Вайсяля – Брента). Между максимумом частоты Вайсяля – Брента и собственным периодом первой моды ВВ в акваториях Баренцева и Карского морей прослеживается хорошо заметное соответствие (рис. 1). Расчет корреляционной зависимости между собственным периодом первой моды и максимумом частоты Вайсяля – Брента (рис. 2) показал наличие обратной связи, причем величина коэффициента корреляции изменяется в зависимости от сезона от 0,33 (в октябре) до 0,59 (в феврале).



Р и с. 1. Распределение максимума частоты Вайсяля – Брента по глубине (*a*) и собственного периода первой моды свободных внутренних волн (*b*) в июле в Баренцевом и Карском морях. Длина волны 1000 м

F i g. 1. Vertical distribution of the Väisälä-Brunt frequency (*a*) and own period of the free internal waves' first mode (*b*) in July in the Barents and Kara seas. Wavelength is 1000 m

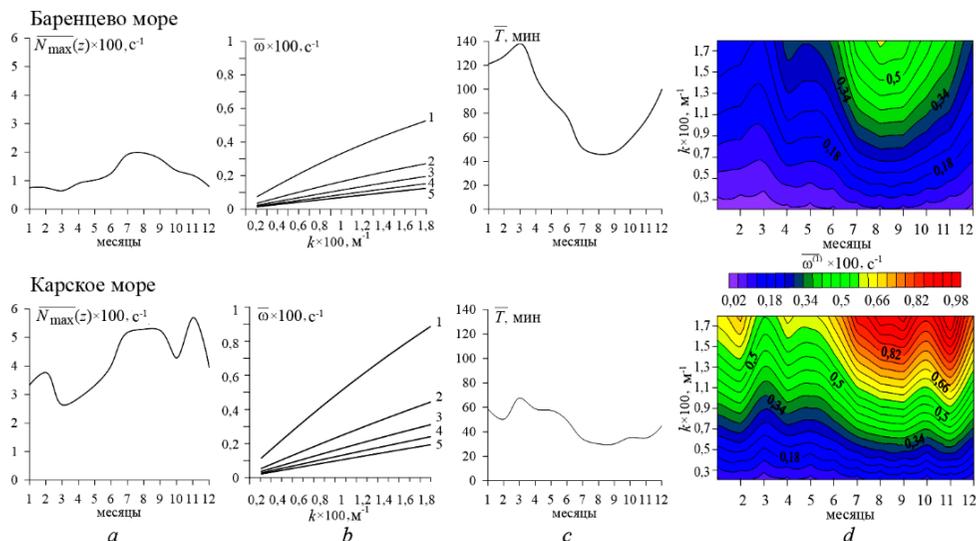


Р и с. 2. Внутригодовой климатический ход коэффициента корреляции между максимумом частоты Вэйсälä – Брента по глубине и собственным периодом первой моды свободных внутренних волн в акваториях Баренцева и Карского морей

F i g. 2. Intra-year climatic variation of the correlation coefficient between the Väisälä-Brunt frequency maximum and the own period of the free internal waves' first mode in the Barents and Kara seas' water area

Чтобы изучить внутригодовую изменчивость вертикальной структуры поля плотности Баренцева и Карского морей, рассчитывались осредненные по акваториям максимумы частоты плавучести по глубине $\overline{N_{\max}}(z)$. Для анализа годового хода дисперсионных характеристик ВВ рассчитывались осредненные собственные частоты $\overline{\omega^{(n)}}$ пяти низших мод и осредненный собственный период \overline{T} первой моды. На графике (рис. 3, а) виден ярко выраженный пик во внутригодовом цикле $\overline{N_{\max}}(z)$ в Баренцевом море в июле и августе ($\overline{N_{\max}}(z) \approx 0,02 \text{ с}^{-1}$). В Карском море наибольшие значения $\overline{N_{\max}}(z) \approx 0,055 \text{ с}^{-1}$ наблюдаются с июля по сентябрь и в ноябре (рис. 3, а). В эти же месяцы $\overline{\omega^{(1)}}$ достигает максимальных (рис. 3, d), а \overline{T} – минимальных значений (рис. 3, c).

Для волн длиной 1000 м наибольшее значение $\overline{\omega^{(1)}}$ и наименьшее значение \overline{T} в Баренцевом море равны соответственно $0,0025 \text{ с}^{-1}$ и 45 мин, в Карском море – $0,0038 \text{ с}^{-1}$ и 30 мин. Коэффициент корреляции R между внутригодовыми циклами осредненных по морю максимума частоты плавучести и собственной частоты первой моды ВВ превышает 0,9. Значение R между внутригодовыми циклами $\overline{N_{\max}}(z)$ и \overline{T} составляет примерно $-0,95$ как для Баренцева, так и для Карского моря. В Баренцевом море значения осредненных собственных частот для рассматриваемого диапазона длин волн не превышают $0,006 \text{ с}^{-1}$, в Карском море – $0,012 \text{ с}^{-1}$.



Р и с. 3. Внутригодная изменчивость $\overline{N_{\max}}(z)$ (a); осредненные дисперсионные кривые пяти низших мод для июля (b); внутригодная изменчивость \overline{T} (c) и $\overline{\omega^{(1)}}$ (d) для Баренцева и Карского морей

F i g. 3. Intra-year variability $\overline{N_{\max}}(z)$ (a); averaged dispersion curves of five lowest modes for July (b); intra-year variability \overline{T} (c) and $\overline{\omega^{(1)}}$ (d) for the Barents and Kara seas

В Карском море $\overline{N_{\max}}(z)$ больше, чем в Баренцевом, в среднем в три раза; для одной и той же длины волны $\overline{\omega^{(n)}}$ больше примерно в два раза, а \overline{T} – меньше примерно в два раза (рис. 3). Такое различие объясняется особенностями гидрологического режима морей, большую роль в формировании которого играет сток пресных материковых вод. Речной сток в Баренцево море невелик по отношению к площади моря, максимум его наблюдается в конце весны – начале лета. Сток в Карское море в несколько раз превышает объем речных вод, поступающих в Баренцево море, достигая максимума в конце лета – начале осени¹. Отметим, что гидрологический режим арктических морей зависит также от солнечной радиации. В теплый сезон года активное таяние льда приводит к распреснению верхнего слоя воды и увеличению градиентов плотности.

Для детального изучения связи вертикальной структуры поля плотности с дисперсионными свойствами внутренних волн построены графики внутригодной изменчивости $\overline{N_{\max}}(z)$ и $\overline{\omega^{(1)}}$ в физико-географических районах (рис. 4), предложенных в работах [14–16]. В Баренцевом море выделено пять районов: 1) Юго-Западный, или Медвежинский; 2) Северо-Западный, или Шпицбергенский; 3) Северный; 4) Северо-Восточный; 5) Юго-Восточный, или Колгуево-Вайгачский. В Карском море выделено четыре района: 6) Юго-Западный, или Ямальский; 7) Северо-Западный; 8) Центральный; 9) Северный.

¹ Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. М. : Изд-во. МГУ, 1982. 192 с. ; Тимофеев В. Т. Устойчивость вод Баренцева моря // Проблемы Арктики. 1946. Вып. 3. С. 5–7.



Р и с. 4. Физико-географическое районирование
F i g. 4. Physical-geographical division into regions

Из рис. 5, 6 видно, что в Баренцевом море наибольшие значения $\overline{N_{\max}}(z)$ определяются в Северном районе в июле ($0,03 \text{ с}^{-1}$), в Карском море – в июне в Ямальском, с июля по сентябрь в Северо-Западном районе ($0,09 \text{ с}^{-1}$). Максимальные значения $\overline{\omega^{(1)}}$ отмечаются в тех же районах в те же месяцы. Наибольшие значения $\overline{N_{\max}}(z)$ в Медвежинском ($\approx 0,015 \text{ с}^{-1}$), Шпицбергенском ($\approx 0,02 \text{ с}^{-1}$) и Северо-Восточном ($\approx 0,018 \text{ с}^{-1}$) районах Баренцева моря наблюдаются в июле – августе (рис. 5). Это связано с усиленным таянием льда в летнее время и, как следствие, увеличением плотностной стратификации вод. В Колгуево-Вайгачском районе наибольшее значение усредненного максимума частоты плавучести наблюдается в мае и в августе и составляет $\approx 0,018 \text{ с}^{-1}$. Первый пик связан с влиянием стока реки Печоры, второй – с увеличением солнечной радиации и таянием льда.

В Ямальском районе Карского моря максимальные значения $\overline{N_{\max}}(z) \approx 0,09 \text{ с}^{-1}$ приходятся на начало лета (рис. 6). Распресненная водами Печоры баренцевоморская вода через пролив Карские ворота попадает в Карское море, что приводит к увеличению плотностной стратификации вод в Ямальском районе². Северные акватории Баренцева и Карского морей имеют сходную внутригодовую изменчивость $\overline{N_{\max}}(z)$ (рис. 5, 6), поскольку Западно-Новоземельское течение снабжает атлантическими водами северные районы Карского моря, а течение Макарова несет воды Карского моря в северную часть Баренцева моря.

² Тимофеев В. Т. Устойчивость вод Баренцева моря // Проблемы Арктики. 1946. Вып. 3. С. 5–7.

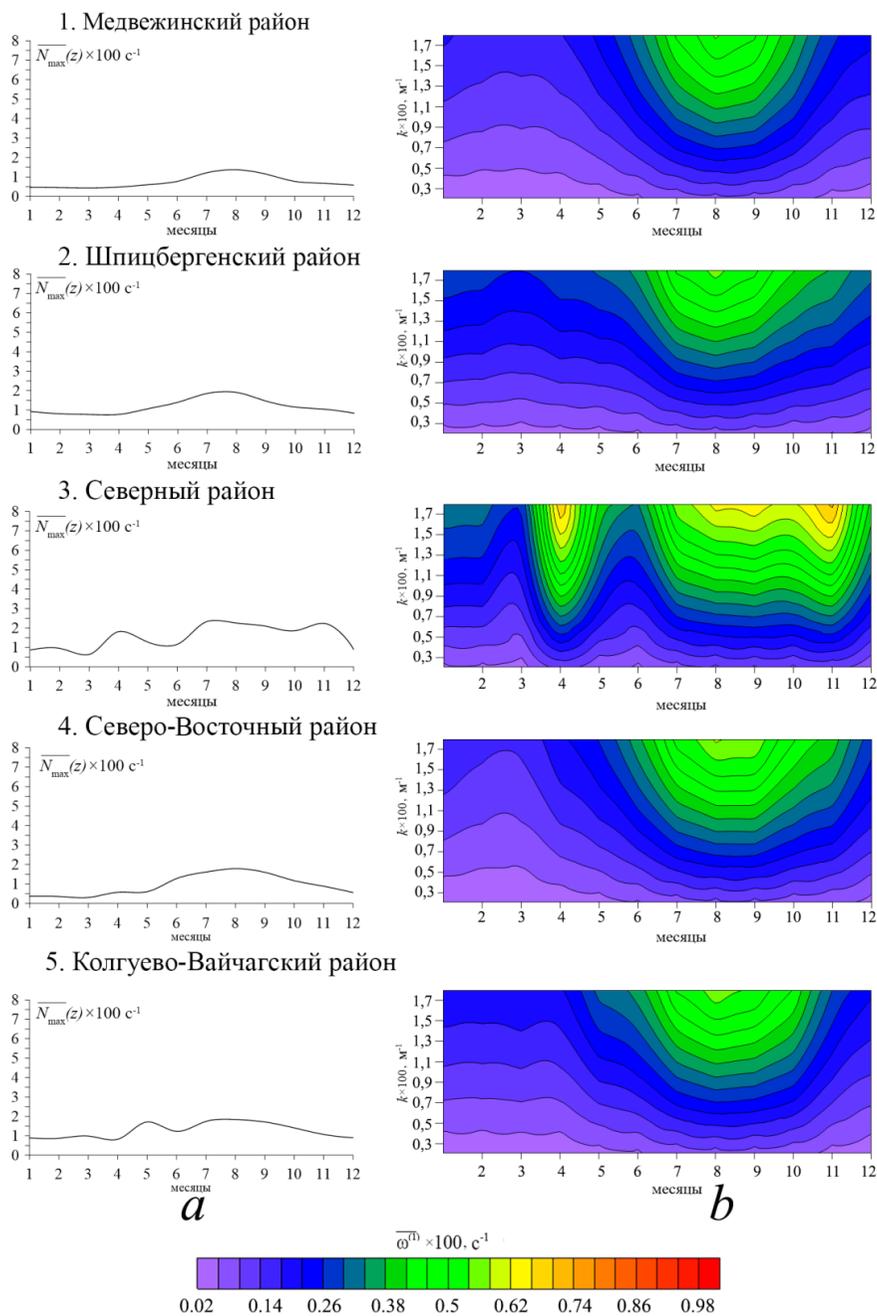
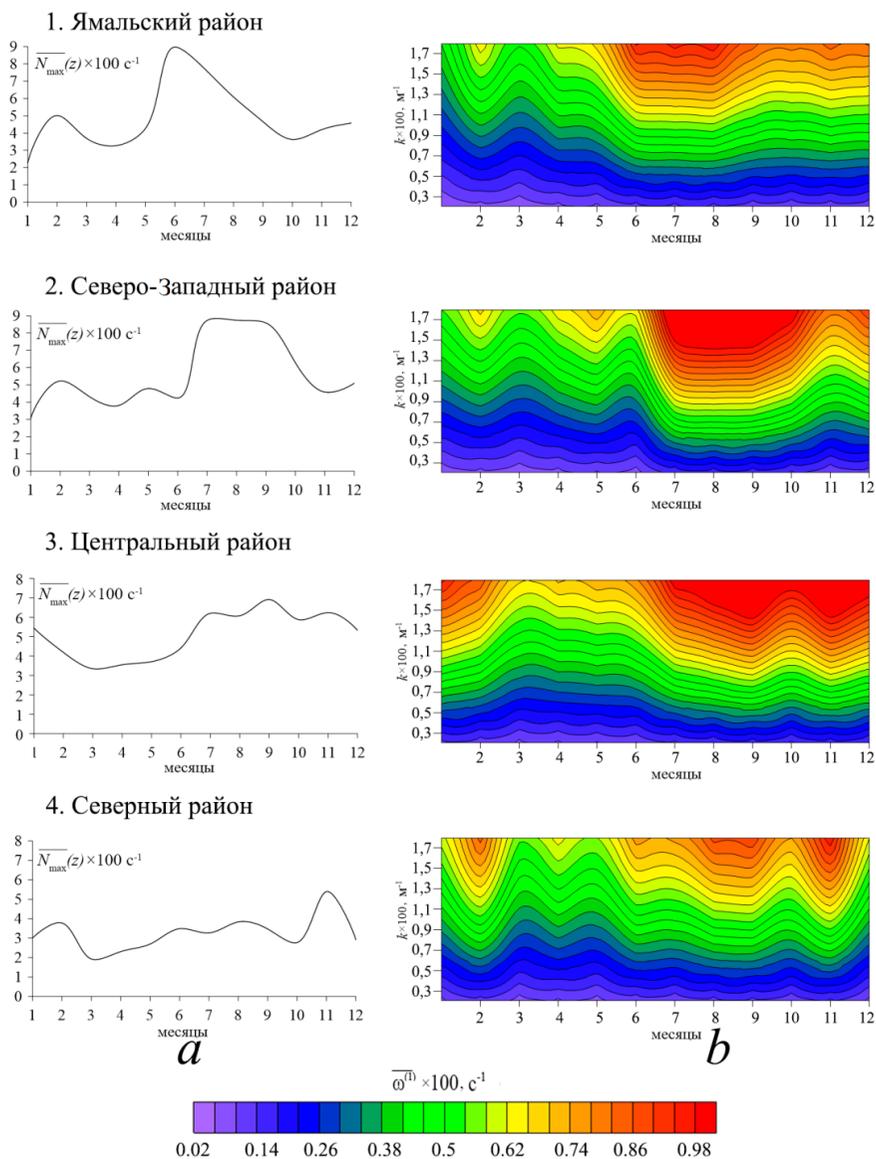


Рис. 5. Внутригодовая изменчивость средних по районам Баренцева моря значений максимумов частоты Вэйсälä – Брента (*a*) и собственных частот первой моды внутренних волн (*b*)

Fig. 5. Intra-year variability of the Väisälä-Brunt frequency maximums averaged over the Barents Sea regions (*a*) and the own frequencies of the internal waves' first mode (*b*)



Р и с. 6. Внутригодовая изменчивость осредненных по районам Карского моря значений максимумов частоты Вэйсälä – Брента (*a*) и собственных частот первой моды внутренних волн (*b*)

F i g. 6. Intra-year variability of the Väisälä-Brunt frequency maximums averaged over the Kara Sea regions (*a*) and the own frequencies of the internal waves' first mode (*b*)

Внутригодовой цикл $\overline{\omega^{(n)}}$ близок к циклу $\overline{N_{\max}(z)}$. Коэффициент корреляции, рассчитанный для внутригодовых циклов среднего максимума частоты плавучести и осредненных собственных частот первой моды ВВ для всех районов Баренцева и Карского морей, превышает 0,9. Это справедливо и для других мод ВВ.

Заключение

На основе данных *World Ocean Atlas 2013* о температуре и солености проведено исследование дисперсионных свойств свободных внутренних волн в Баренцевом и Карском морях. В результате решения основной краевой задачи типа Штурма – Лиувилля рассчитаны собственные частоты пяти низших мод и собственный период первой моды внутренних волн. Выполнен анализ связи вертикальной структуры поля плотности и дисперсионных свойств свободных внутренних волн, проведено сравнение дисперсионных характеристик свободных внутренних волн на основе анализа региональных гидрологических особенностей Баренцева и Карского морей.

Установлено, что в месяцы максимальных градиентов плотности наблюдаются самые высокочастотные и самые короткопериодные внутренние волны. Во внутригодовом цикле максимум осредненной по всей акватории моря частоты плавучести по глубине в Баренцевом море достигает наибольших значений в июле и августе ($\approx 0,02$ 1/с), в Карском – с июля по сентябрь ($\approx 0,055$ 1/с) и в ноябре ($\approx 0,058$ 1/с). В эти же месяцы отмечаются максимальные значения осредненных собственных частот и минимальные значения осредненного собственного периода внутренних волн.

Согласно выделенным физико-географическим районам, в Баренцевом море наибольшие значения $\overline{N_{\max}}(z)$ наблюдаются в Северном районе в июле и достигают $0,03$ с⁻¹. В Карском море наибольшие значения $\overline{N_{\max}}(z)$ наблюдаются в июне в Ямальском, в июле – сентябре в Северо-Западном районах и достигают $0,09$ с⁻¹.

Коэффициент корреляции между внутригодовым циклом $\overline{N_{\max}}(z)$ и внутригодовыми циклами $\overline{\omega^{(n)}}$ и \overline{T} внутренних волн превышает 0,9 как для Баренцева, так и для Карского моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поверхностные и внутренние волны в арктических морях / Под ред. И. В. Лавренова, Е. Г. Морозова. СПб. : Гидрометеоздат. 2002. 362 с.
2. Букатов А. Е. Внутренние волны, генерируемые в море со слоем скачка плотности периодическими колебаниями участка дна // Морские гидрофизические исследования. 1974. № 1. С. 44–52. URL: <https://istina.msu.ru/download/24669320/1iT3bx:049odt8Qk9gdSiPrvVJnnzLj1uM> (дата обращения: 08.11.2019).
3. Букатов А. Е. Волны в море с плавающим ледяным покровом. Севастополь : ФГБУН МГИ, 2017. 360 с.
4. Некоторые результаты анализа короткопериодических внутренних волн / А. Е. Букатов [и др.] // Морские гидрофизические исследования. 1977. Т. 79, № 4. С. 250–261. URL: <https://istina.msu.ru/download/82807687/1iT3fU:5Lw1dgWKOOk-5zxZk5UnhqA5p4s/> (дата обращения: 08.11.2019).
5. Tomczak M. Über interne Wellen in der Nähe der Trägheitsperiode // Deutsche Hydrographische Zeitschrift. 1968. Vol. 21, iss. 4. P. 145–151. <https://doi.org/10.1007/BF02307727>
6. Morozov E. G. Oceanic Internal Tides: Observations, Analysis and Modeling. Springer, 2018. 304 p. doi:10.1007/978-3-319-73159-9
7. Морозов Е. Г., Пака В. Т. Внутренние волны в высокоширотном бассейне // Океанология. 2010. Т. 50, № 5. С. 709–715.

8. World Ocean Atlas 2013. Volume 1: Temperature / R. A. Locamini [et al.] ; S. Levitus (ed.); A. Mishonov (technical ed.). Silver Spring, MD : U.S. Department of Commerce, 2013. 40 pp. (NOAA Atlas NESDIS 73). URL: http://data.nodc.noaa.gov/woa/WOA13/DOC/woa13_vol1.pdf (date of access: 08.11.2019).
9. World Ocean Atlas 2013. Volume 2: Salinity / M. M. Zweng [et al.] ; S. Levitus (ed.); A. Mishonov (technical ed.). Silver Spring, MD : U.S. Department of Commerce, 2013. 39 pp. (NOAA Atlas NESDIS 74). URL: http://data.nodc.noaa.gov/woa/WOA13/DOC/woa13_vol2.pdf (date of access: 08.11.2019).
10. *Букатов А. Е., Соловей Н. М.* Оценка связи вертикальной структуры поля плотности и характеристик внутренних волн с крупномасштабной атмосферной циркуляцией в акваториях Перуанского и Бенгельского апвеллингов // *Процессы в геосредах*. 2017. № 2. С. 485–490.
11. *Миропольский Ю. З.* Динамика внутренних гравитационных волн в океане. Л. : Гидрометеониздат, 1981. 302 с.
12. *Гриценко В. А., Красицкий В. П.* Об одном способе расчета дисперсионных соотношений и собственных функций внутренних волн в океане по данным натуральных измерений // *Океанология*. 1982. Т. 22, № 4. С. 545–549.
13. *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. URL: [http://www.aari.ru/misc/publicat/paa/PAA-86/PAA86-06\(60-69\).pdf](http://www.aari.ru/misc/publicat/paa/PAA-86/PAA86-06(60-69).pdf) (дата обращения: 08.11.2019).
14. *Горбацкий Г. В.* Физико-географическое районирование Арктики. Ч. 2: Полоса окраинных морей с островами. Л. : Изд-во ЛГУ, 1970. 120 с.
15. *Петров К. М.* Принципы физико-географической дифференциации арктических морей: Карское море // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2008. № 6. С. 19–30.
16. *Букатов А. А., Павленко Е. А., Соловей Н. М.* Особенности пространственно-временной изменчивости частоты Вьяйсяля-Брента в Баренцевом и Карском морях // *Процессы в геосредах*. 2018. № 3. С. 1004–1013.

Об авторах:

Букатов Антон Алексеевич, старший научный сотрудник, отдел 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**, 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**, ne.le.7@hotmail.com

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**, mhi.pavlenko@gmail.com