


Свободные короткопериодные внутренние волны в арктических морях России

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

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
 ne.le.7@hotmail.com

Поступила в редакцию 18.05.2021 г., после доработки – 01.07.2021 г.

Цель. Цель данной работы – исследование зависимости вертикальной структуры и фазовых характеристик свободных короткопериодных внутренних волн (ВВ) от стратификации плотности в Баренцевом, Карском, Лаптевых и Восточно-Сибирском морях.

Методы и результаты. В результате решения основной краевой задачи типа Штурма – Ливуилля рассчитаны амплитуды вертикальной составляющей скорости, собственные частоты и собственные периоды первой моды внутренних волн. Для расчета поля плотности использовались данные реанализа *World Ocean Atlas 2018* о температуре и солёности за период 1955–2017 гг. с разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$. Проанализирована связь вертикальной структуры и дисперсионных свойств внутренних волн с распределением плотности по глубине. Показано, что осредненная по акватории моря глубина залегания максимума амплитуды вертикальной составляющей скорости ВВ в Баренцевом и Карском морях составляет в середине зимы ~ 90 м и ~ 75 –80 м летом, в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море ~ 60 м в течение всего года.

Выводы. В месяцы максимальных градиентов плотности наблюдаются самые высокочастотные и самые короткопериодные ВВ. Максимальная устойчивость вод в Баренцевом море наступает в июле – августе, в Карском – в июле – сентябре и ноябре, в море Лаптевых – в июне, ноябре, в Восточно-Сибирском море – в июле. В эти же месяцы наблюдаются максимальные значения осредненных собственных частот, минимальные значения осредненных собственных периодов и амплитуд вертикальной составляющей скорости внутренних волн.

Ключевые слова: Баренцево море, Карское море, море Лаптевых, Восточно-Сибирское море, частота плавучести, внутренние волны, собственная частота, собственный период, вертикальная составляющая скорости

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0004.

Для цитирования: Букатов А. А., Соловей Н. М., Павленко Е. А. Свободные короткопериодные внутренние волны в арктических морях России // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 6. С. 645–658. doi:10.22449/0233-7584-2021-6-645-658

Free Short-Period Internal Waves in the Arctic Seas of Russia

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

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
 ne.le.7@hotmail.com

Purpose. The aim of the work is to investigate vertical structure and phase characteristics of free short-period internal waves (IW), and to assess their dependence on density stratification in the Barents, Kara, Laptev and East Siberian seas.

© Букатов А. А., Соловей Н. М., Павленко Е. А., 2021

Methods and Results. Solving the main boundary problem of the Sturm-Liouville theory has resulted in calculating the amplitudes of velocity vertical component, own frequencies and periods of the first mode of internal waves. The density field was calculated using the reanalysis data (*World Ocean Atlas* 2018) on temperature and salinity for 1955–2017 with a resolution $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. The relation between the internal waves' vertical structure and dispersion features, and the density depth distribution was analyzed. It is shown that the averaged over the sea area depth of the maximum amplitude of the IW velocity vertical component in the Barents and Kara seas is ~ 90 m in the mid winter and ~ 75 – 80 m in summer, and in the Laptev and East Siberian seas – ~ 60 m throughout the whole year.

Conclusions. In the months when the density gradients are maximal, the internal waves of the highest frequency and the shortest period are observed. The maximum water stability in the Barents Sea takes place in July – August, in the Kara Sea – in July – September and November, in the Laptev Sea – in June, November, and in the East Siberian Sea – in July. Just in the same months, the maximum values of the averaged own frequencies, and the minimum values of the averaged own periods and amplitudes of the vertical component of the internal waves' velocity are observed.

Keywords: Barents Sea, Kara Sea, Laptev Sea, East Siberian Sea, buoyancy frequency, internal waves, own frequency, own period, vertical component of velocity

Acknowledgements: the investigation was carried out within the framework of the state task on theme No. 0555-2021-0004.

For citation: Bukatov, A.A., Solovei, N.M. and Pavlenko, E.A., 2021. Free Short-Period Internal Waves in the Arctic Seas of Russia. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(6), pp. 599-611. doi:10.22449/1573-160X-2021-6-599-611

Введение

Одной из причин возникновения внутренних волн в океане является обтекание неровностей дна приливными течениями, в результате чего происходят периодические вертикальные смещения изопикнических поверхностей. В толще океана эти возмущения распространяются в виде свободных внутренних волн. Однако при исследовании внутренних волн в Арктическом бассейне необходимо учитывать эффект критической широты. Широта, близкая к 75° , является критической для полусуточных внутренних волн, севернее этой широты ВВ с приливной частотой не могут существовать в виде свободных волн [1, 2]. Механизм их генерации в высоких широтах такой же, как в низких и умеренных, но в высоких широтах внутренняя волна приливного периода разрушается и порождает пакеты свободных короткопериодных волн [3]. В литературе описан ряд экспериментальных наблюдений ВВ, которые подтверждают существование внутренних короткопериодных волн в Арктическом бассейне: например, в [4] отмечены ВВ в Баренцевом море с периодами 15–60 мин.

Настоящая работа посвящена исследованию свободных короткопериодных внутренних волн, изучению связи их вертикальной структуры и фазовых характеристик с распределением частоты Вьяйсяля – Брента по глубине в морях Баренцевом, Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском.

Материалы и методика

Для расчета среднемесячных значений плотности использовались данные реанализа *World Ocean Atlas* 2018 о температуре и солености за период 1955–2017 гг. в узлах четвертьградусной сетки с шагом 5 м по глубине до горизонта 100 м и с шагом 25 м – до горизонта 150 м [5, 6]. Область исследования: 66–

82° с. ш., 16–180° в. д. Полученные массивы плотности проверялись на наличие инверсий и в случае необходимости корректировались путем замены инверсионных величин значениями, интерполированными по соседним горизонтам [7]. В каждом узле сетки рассчитывались профили частоты плавучести $N(z)$. Определялись максимум частоты Вайсяля – Брента по глубине ($N_{\max}(z)$) и глубина его залегания ($HN_{\max}(z)$).

Исследование внутренних волн проводилось исходя из линейных уравнений движения непрерывно стратифицированной жидкости в форме Фьельдстада [8], которые имеют решение в виде суперпозиции плоских волн [9]. В частности, для вертикальной компоненты скорости $w(x, y, z, t)$ (x, y – горизонтальные координаты, t – время) имеет место представление

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

где $\omega^{(n)}(k)$ – дисперсионное соотношение (собственная частота) для моды с номером n и волновым числом $k = (k_x^2 + k_y^2)^{1/2}$; $W^{(n)}(k, z)$ – 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:

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

где $\lambda^{(n)} = (k / \omega^{(n)})^2$, $\omega^{(n)}$ – собственная частота; k – волновое число; H – глубина.

Для численной реализации 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 [10].

Известно, что первая мода дает наибольший вклад в энергетический спектр пакета волн, в связи с этим рассматривались амплитуды вертикальной составляющей скорости ($W(z)$), собственные частоты ($\omega^{(1)}$) и периоды (T) первой моды [11]. Для исследования дисперсионных свойств ВВ рассчитывались собственные частоты для длин волн (λ) в интервале 250–1500 м с шагом 25 м. Наличие в арктических морях волн с длинами > 250 м подтверждается радиолокационным зондированием из космоса [12]. Детальность проявлений ВВ на РЛ-снимках ограничена размерами пикселя 75×75 м, и минимально различимая длина волны составляет 250–300 м. Волны с меньшими длинами на снимках в указанных в [12] режимах РЛ-съемки определить сложно.

Анализ результатов

Несмотря на близкое географическое расположение морей Баренцева, Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского, каждое из них имеет свои региональные особенности, которые наглядно иллюстрирует рис. 1. Для количественной характеристики и сравнения внутригодовой изменчивости стратификации вод рассчитано среднее значение максимума частоты Вайсяля – Брента

$(N_{\max}(z)_{\text{cp}})$ по глубине и средняя глубина залегания максимума ($HN_{\max}(z)_{\text{cp}}$) для каждого моря.

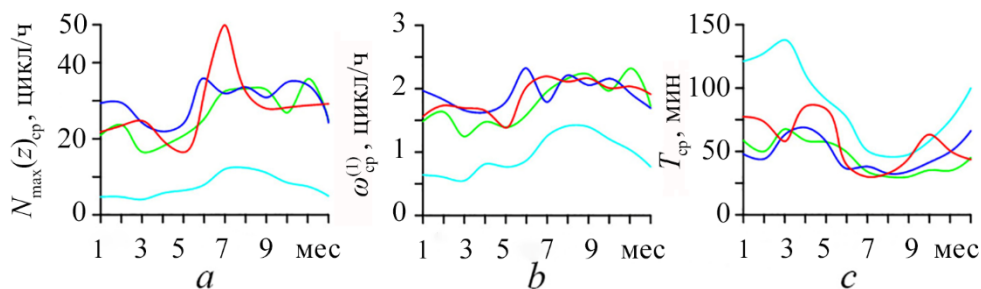


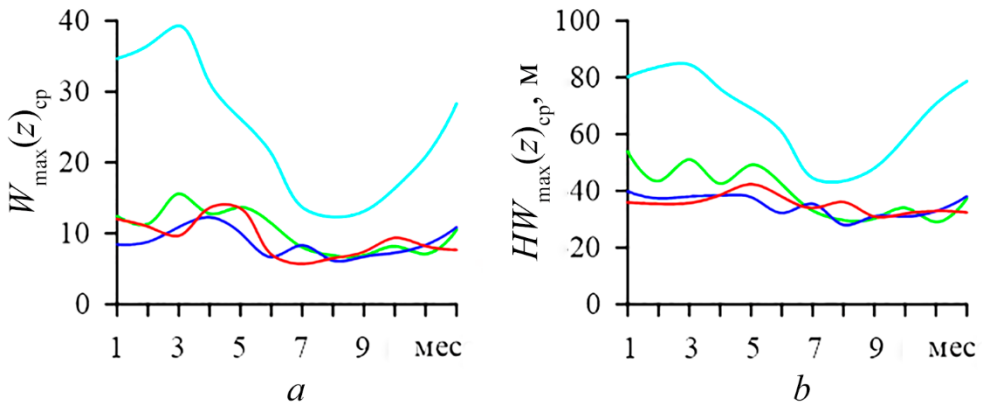
Рис. 1. Внутригодовой ход осредненных по акватории моря максимума частоты плавучести по глубине (а), собственной частоты (b) и собственного периода (с) первой моды при длине волны 1000 м для Баренцева моря (бирюзовая кривая), Карского моря (зеленая кривая), моря Лаптевых (синяя кривая), Восточно-Сибирского моря (красная кривая)

Fig. 1. Intra-annual variation of the averaged over the sea area maximum of the buoyancy frequency over depth (a), own frequency (b) and own period (c) of the first mode at a wavelength 1000 m for the Barents (turquoise curve), Kara (green curve), Laptev (blue curve) and East Siberian (red curve) seas

Видно (рис. 1, а), что наибольшие градиенты плотности во всех рассматриваемых морях наблюдаются в летние месяцы, что связано с таянием льда и увеличением материкового стока. В Баренцевом море наибольшие значения $N_{\max}(z)_{\text{cp}}$ составляют $\sim 12,4$ цикл/ч, в Карском море и море Лаптевых $\sim 35,8$ цикл/ч, в Восточно-Сибирском море $\sim 49,8$ цикл/ч. Максимальная устойчивость вод в Баренцевом море наступает в июле – августе, в Карском – в июле – сентябре и в ноябре, в море Лаптевых – в июне, ноябре, в Восточно-Сибирском море – в июле. Значения $N_{\max}(z)_{\text{cp}}$ в Баренцевом море в несколько раз меньше, чем в других морях. Низкая устойчивость вод в Баренцевом море объясняется влиянием Нордкапского течения. При своем движении на восток атлантические воды, имеющие высокую соленость и температуру, охлаждаются и опускаются вниз, что приводит к сглаживанию разницы в плотности между слоями и к потере устойчивого равновесия слоев [13]. Речной сток в Баренцево море невелик, однако под влиянием материковых вод находится почти половина площади морей Карского и Лаптевых. Определяющая роль в формировании гидрологических условий этих морей принадлежит процессам, протекающим в зонах смешения поверхностных арктических вод с речными водами. В районах сильного влияния речного стока в результате смешения речных и поверхностных арктических вод образуется вода с относительно высокой температурой и низкой соленостью. На границе их раздела (горизонт 5–10 м) создаются большие градиенты плотности [14]. Материковый сток в Восточно-Сибирское море существенно не влияет на его общий гидрологический режим, а лишь обуславливает некоторые гидрологические особенности прибрежных участков в летнее время. Однако Восточно-Сибирское море – самое ледовитое из арктических морей, с октября – ноября по июнь – июль оно полностью покрыто льдом. Значительное увеличение $N_{\max}(z)_{\text{cp}}$ в июле, по-видимому, связано с усиленным таянием льда в начале лета [15].

На рис. 1, *b* показан внутригодовой ход осредненной по площади моря собственной частоты первой моды ВВ ($\omega^{(1)}_{cp}$). Для длины волны 1000 м наибольшая $\omega^{(1)}_{cp}$ и наименьший осредненный по акватории моря собственный период первой моды ВВ (T_{cp}) в Баренцевом море составляют 1,41 цикл/ч и 45 мин, в Карском море 2,31 цикл/ч и 30 мин, в море Лаптевых 2,32 цикл/ч и 33 мин, в Восточно-Сибирском море 2,19 цикл/ч и 30 мин. В месяцы максимальных градиентов плотности наблюдаются самые высокочастотные волны. Коэффициент корреляции между внутригодовыми циклами $N_{max}(z)_{cp}$ и $\omega^{(1)}_{cp}$ превышает 0,9 для всех морей.

Внутригодовой ход осредненного по площади моря периода первой моды ВВ приведен на рис. 1, *c*. Значения периодов представлены для длины волны 1000 м, однако качественно график T_{cp} будет иметь такой же вид и для других длин волн из рассматриваемого диапазона. Самые короткопериодные волны наблюдаются в морях Карском и Лаптевых, для которых осредненный за 12 мес T_{cp} ($\lambda = 1000$ м) составляет 46 и 48 мин соответственно, для Баренцева моря 87 мин, для Восточно-Сибирского 57 мин. Также из рис. 1, 2 видно, что ВВ с наименьшими периодами наблюдаются в месяцы наибольших градиентов плотности. Коэффициент корреляции (R) между внутригодовыми циклами $N_{max}(z)_{cp}$ и T_{cp} составляет примерно $-0,95$ для всех морей.

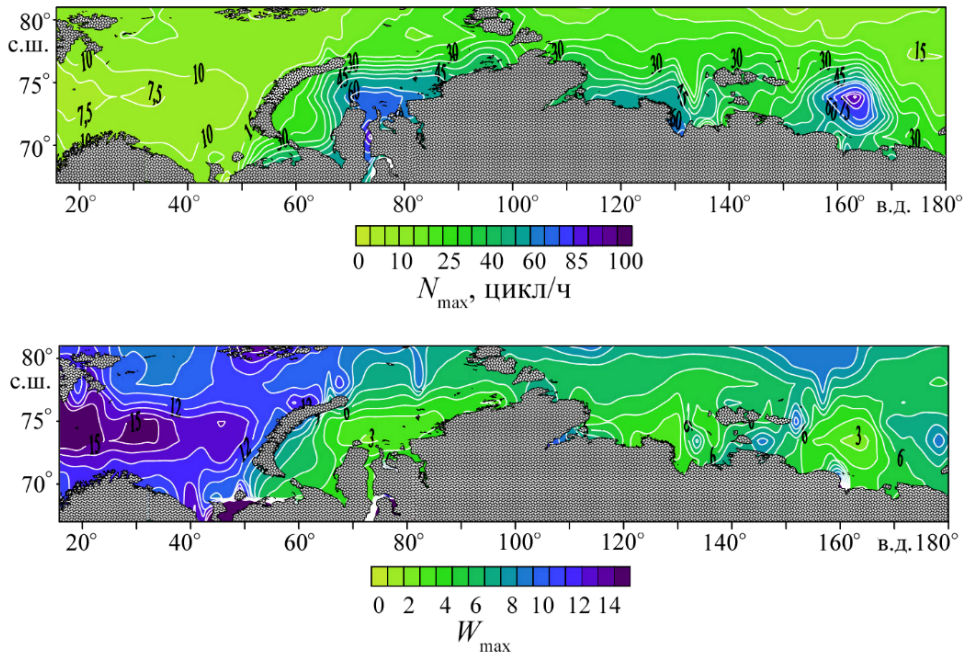


Р и с. 2. Внутригодовой ход осредненных по акватории моря максимума амплитуды вертикальной составляющей скорости первой моды ВВ (в условных единицах) (*a*) и глубины его залегания (*b*) для Баренцева моря (бирюзовая кривая), Карского моря (зеленая кривая), моря Лаптевых (синяя кривая), Восточно-Сибирского моря (красная кривая)

F i g. 2. Intra-annual variation of the averaged over the sea area maximum of the amplitude of the vertical component of the IW first mode velocity (in conventional units) (*a*) and its depth (*b*) for the Barents (turquoise curve), Kara (green curve), Laptev (blue curve) and East Siberian (red curve) seas

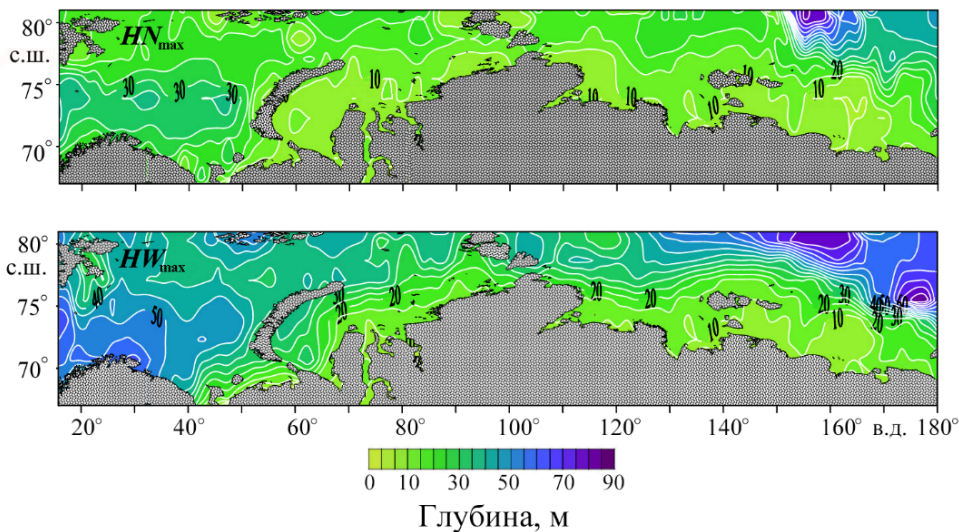
Для анализа вертикальной структуры ВВ в каждом узле сетки рассчитывались профили амплитуд вертикальных составляющих скорости первой моды ВВ, определялись максимум амплитуды вертикальной составляющей скорости ($W_{max}(z)$) по глубине и глубина его залегания ($HW_{max}(z)$). Затем полученные для

каждого месяца значения $W_{\max}(z)$ и $HW_{\max}(z)$ осреднялись по акваториям морей ($W_{\max}(z)_{\text{ср}}$, $HW_{\max}(z)_{\text{ср}}$) (рис. 2). Получено, что наибольшие значения $W_{\max}(z)_{\text{ср}}$ (более интенсивная волновая динамика) наблюдаются в месяцы наименьших градиентов плотности: в Баренцевом и Карском морях – в марте, в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море – в апреле. Коэффициент корреляции между внутригодовыми циклами $N_{\max}(z)_{\text{ср}}$ и $W_{\max}(z)_{\text{ср}}$ превышает $-0,9$ для всех морей (рис. 1, 2).

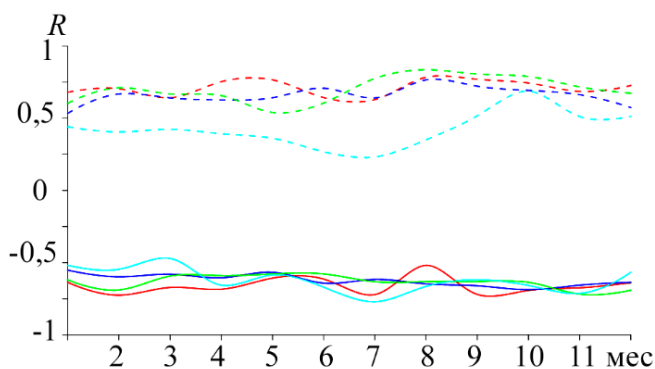


Р и с. 3. Географическое распределение максимумов частоты Вэйсяля – Брента и амплитуды вертикальной составляющей скорости первой моды ВВ (в условных единицах) в августе
Fig. 3. Geographic distribution of maxima of the Väisälä – Brunt frequency and the amplitude of the vertical component of the IW first mode velocity (in conventional units) in August

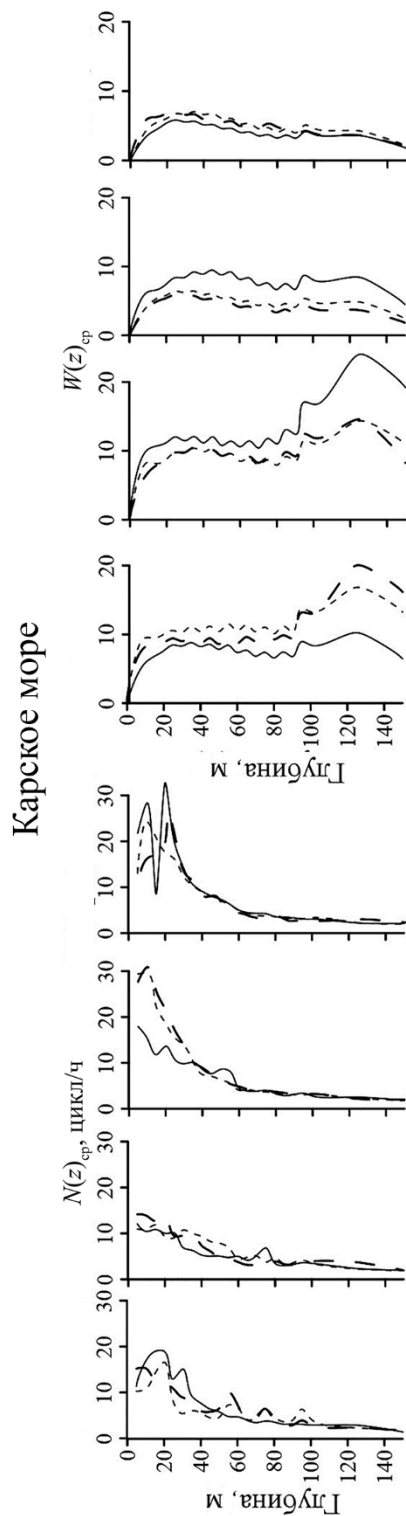
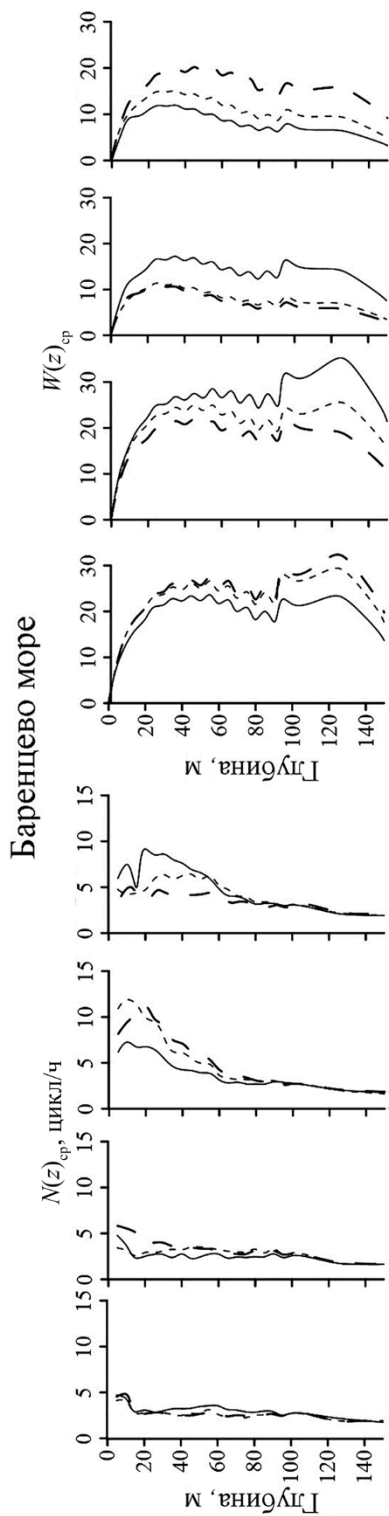
Распределение максимумов частоты Вэйсяля – Брента и амплитуды вертикальной составляющей скорости первой моды ВВ в августе иллюстрирует рис. 3, глубины их залегания – рис. 4. Воды с максимальной устойчивостью расположены в прибрежных районах. Центральная и северная часть морей занята водами с малыми значениями максимума частоты плавучести. Там же наблюдаются наиболее интенсивное вертикальное волновое движение вод и наибольшие глубины залегания $N_{\max}(z)$ и $W_{\max}(z)$. Коэффициент корреляции между $N_{\max}(z)$ и $W_{\max}(z)$ находится в диапазоне $-0,47 \dots -0,77$, между $HN_{\max}(z)$ и $HW_{\max}(z)$ – в диапазоне $0,23-0,78$ (рис. 5).



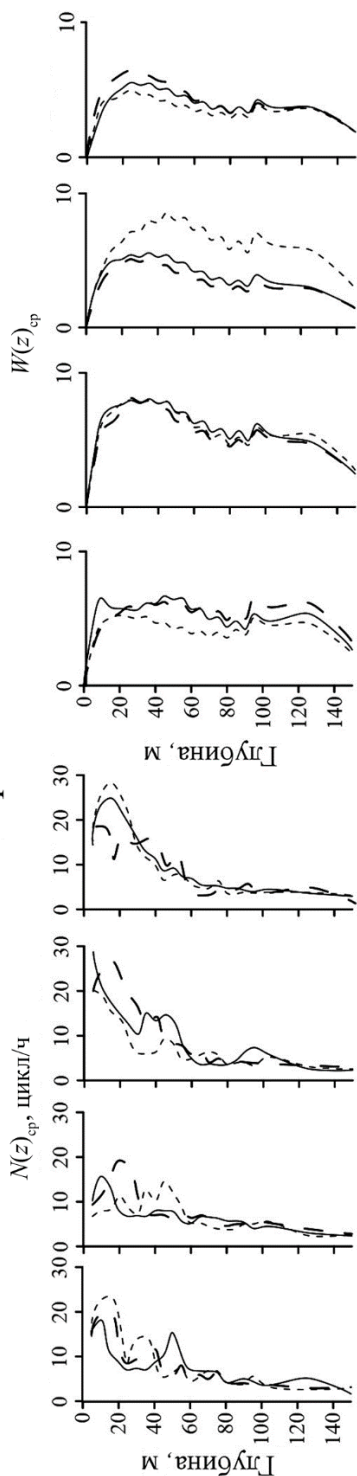
Р и с. 4. Географическое распределение глубины залегания максимумов частоты Вайсяля – Брента и амплитуды вертикальной составляющей скорости первой моды ВВ в августе
Fig. 4. Geographic distribution of depth of maxima of the Väisälä – Brunt frequency and the amplitude of the vertical component of the IW first mode velocity in August



Р и с. 5. Коэффициент корреляции по акваториям морей между N_{\max} и W_{\max} (сплошная линия), HN_{\max} и HW_{\max} (штриховая) для Баренцева моря (бирюзовая кривая), Карского моря (зеленая кривая), моря Лаптевых (синяя кривая), Восточно-Сибирского моря (красная кривая)
Fig. 5. Correlation coefficients between N_{\max} and W_{\max} (solid line), and HN_{\max} and HW_{\max} (dashed line) for the Barents (turquoise curve), Kara (green curve), Laptev (blue curve) and East Siberian (red curve) seas



Море Лаптевых



Восточно-Сибирское море

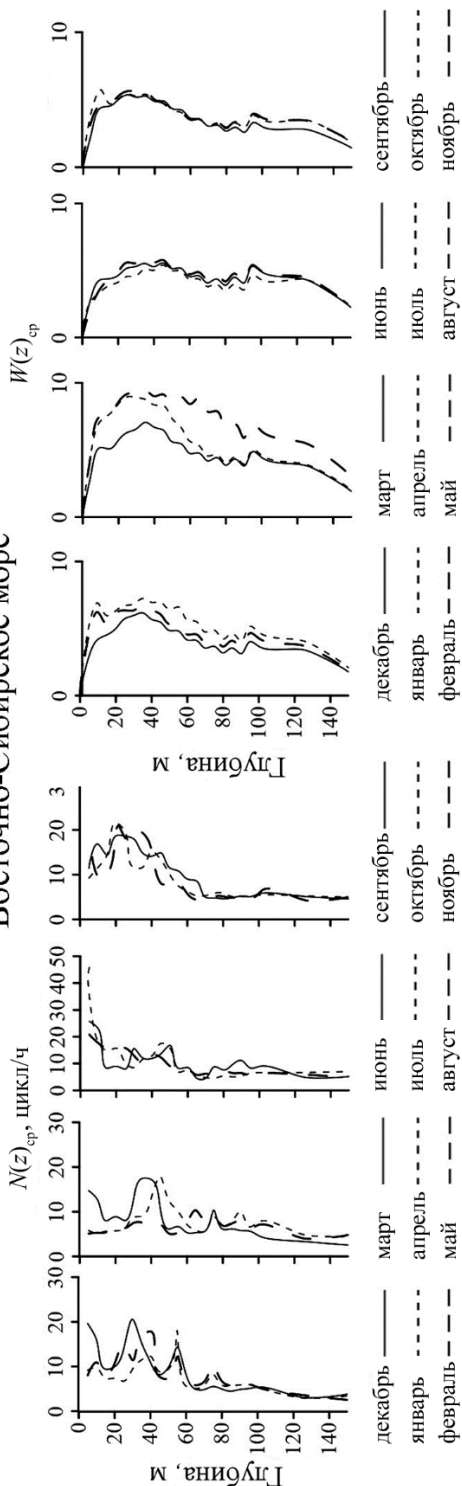


Рис. 6. Распределение по глубине средних по акватории моря частоты плавучести и амплитуды вертикальной составляющей скорости (в условных единицах)

Fig. 6. Distribution over depth of the averaged over the sea area buoyancy frequency and amplitude of the velocity vertical component (in conventional units)

Осредненные по акваториям морей профили частоты Вьясяля – Брента и амплитуды вертикальной составляющей скорости ВВ показаны на рис. 6. Видно, что в Баренцевом море вертикальные градиенты плотности невелики по сравнению с другими рассматриваемыми морями. Слой скачка плотности выражен с июля по октябрь, глубина залегания $N_{\max}(z)_{\text{cp}}$ составляет 20–30 м. В течение всего года развита вертикальная динамика вод, которая наиболее ярко выражена зимой и весной. В Карском море слой скачка плотности сохраняется в течение всего года. Вследствие большого объема Обь-Енисейского стока значения осредненной частоты Вьясяля – Брента достигают 31 цикл/ч. В июне начинается формироваться сезонный пикноклин, с июля по декабрь слой скачка плотности ярко выражен. Глубина залегания осредненного $N_{\max}(z)$ составляет 15–20 м. Особый вид имеет профиль частоты Вьясяля – Брента в сентябре. На глубине ~ 15 м наблюдается резкое уменьшение $N(z)_{\text{cp}}$, и на горизонте 20–25 м частота плавучести достигает своего максимума. Возможно, это связано с началом процессов ледообразования и конвективного перемешивания в зоне пониженной солености вод [16]. Вертикальная волновая динамика развита слабее, чем в Баренцевом море. Однако как в Баренцевом, так и в Карском море максимальные значения $W(z)_{\text{cp}}$ достигаются зимой и весной на горизонтах 120–130 м. В морях Лаптевых и Восточно-Сибирском благодаря влиянию стока рек Хатанга, Лена, Колыма, Индигирка, а также распресненным водам Сибирского Прибрежного течения пикноклин прослеживается на протяжении всего года. Зимой, весной и летом слой пикноклина достигает ~ 100 м, осенью ~ 70 м. Наибольшее значение $N(z)_{\text{cp}}$ определяется в Восточно-Сибирском море в июле и превышает 45 цикл/ч. Вертикальное волновое движение вод в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском развито слабее по сравнению с морями Баренцевым и Карским (рис. 6).

Для изучения зависимости вертикальной структуры и фазовых характеристик ВВ от длины волны были выполнены расчеты осредненных значений амплитуд вертикальной составляющей скорости для $\lambda > 250$ м (рис. 7). Расчеты проводились для глубоководных областей, где $H > 150$ м. Видно, что с увеличением λ значения $W(z)_{\text{cp}}$ увеличиваются незначительно, однако глубина залегания максимума $W(z)_{\text{cp}}$ остается неизменной. Самые большие $W(z)_{\text{cp}}$ наблюдаются в Баренцевом море. Глубина залегания $W_{\max}(z)_{\text{cp}}$ составляет ~ 90 м в Баренцевом и Карском морях в середине зимы и 75–80 м летом, в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском ~ 60 м в течение всего года. Более интенсивная вертикальная волновая динамика вод в Баренцевом море по сравнению с другими морями обусловлена влиянием Нордкапского течения.

Видно (рис. 7 и 8), что осредненные глубины залегания $N_{\max}(z)$ и $W_{\max}(z)$ различаются: для глубоководных областей ($H > 150$ м) $HN_{\max}(z)_{\text{cp}}$ находится в слое сезонного пикноклина (15–40 м), $HW_{\max}(z)_{\text{cp}}$ – в слое основного пикноклина (60–90 м), т. е. $HN_{\max}(z)_{\text{cp}} < HW_{\max}(z)_{\text{cp}}$.

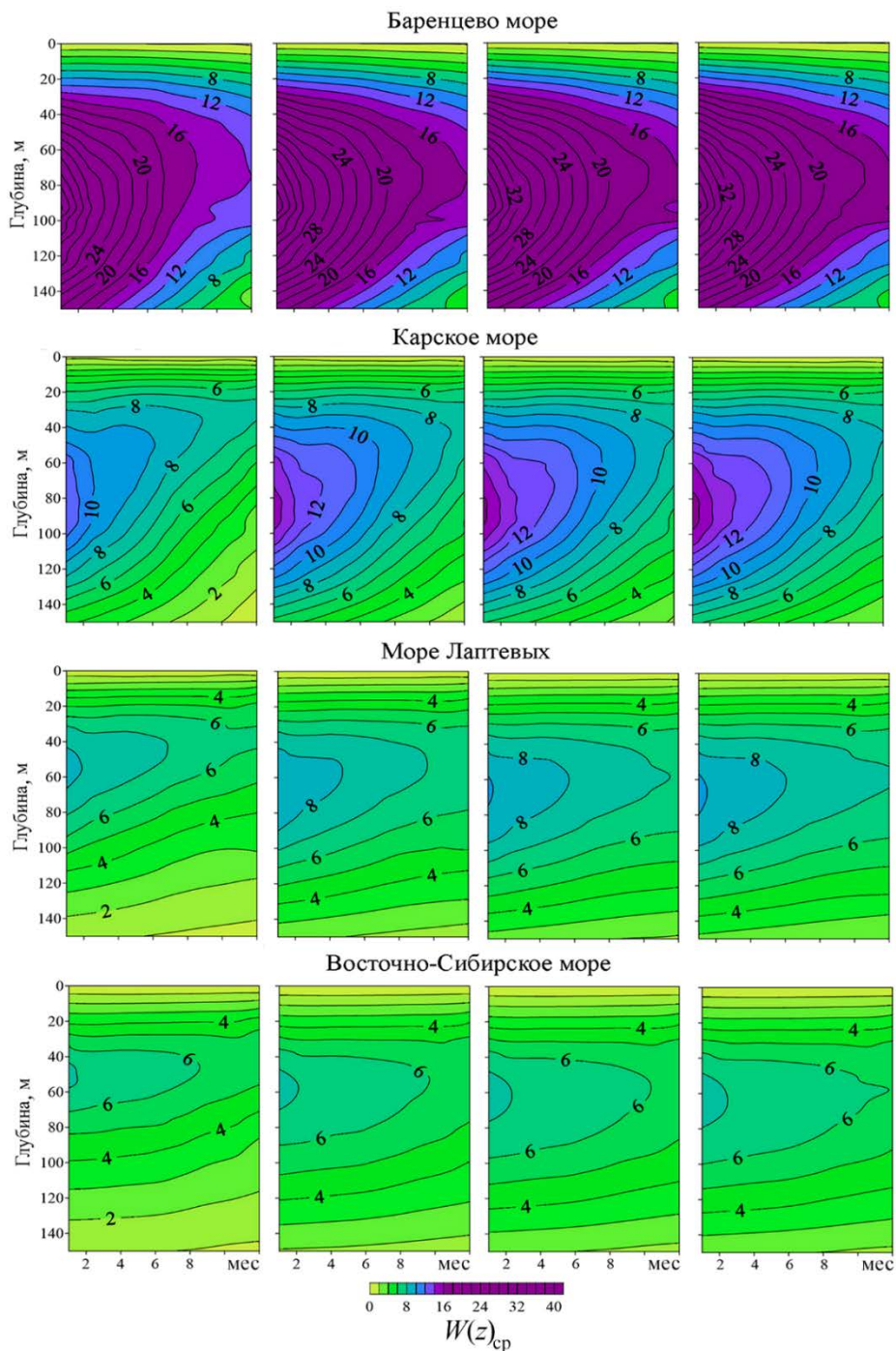


Рис. 7. Внутригодовая изменчивость осредненной по акватории моря амплитуды вертикальной составляющей скорости первой моды ВВ (в условных единицах) при $H > 150$ м и длине волн 250, 500, 750, 1000 м (слева направо)

Fig. 7. Intra-annual variability of the averaged over the sea area amplitude of vertical component of the IW first mode velocity (in conventional units) at $H > 150$ m and the wavelengths 250, 500, 750, 1000 m (from left to right)

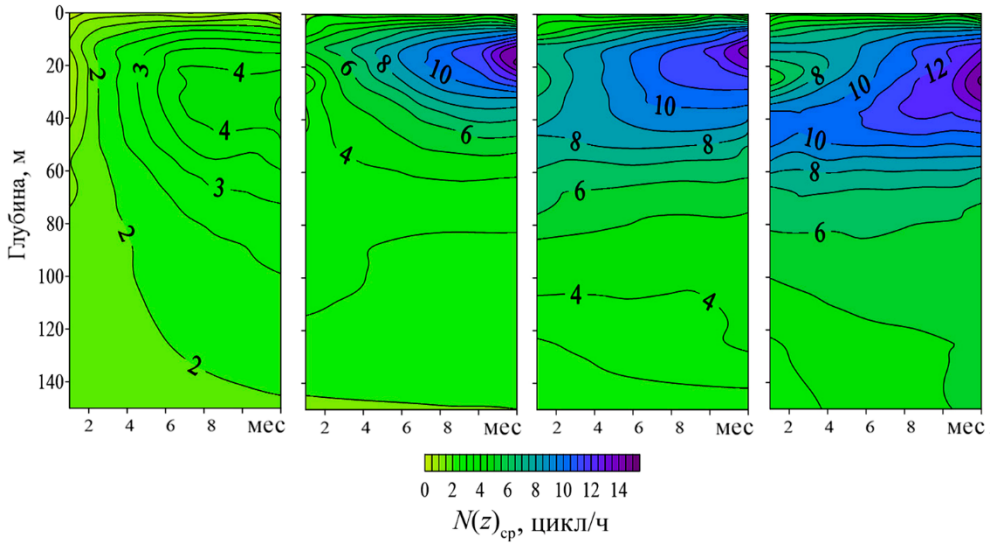


Рис. 8. Внутригодовая изменчивость осредненной по акватории моря частоты плавучести в морях Баренцевом, Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском (слева направо) при $H > 150$ м
Fig. 8. Intra-annual variability of the averaged over the sea area buoyancy frequency in the Barents, Kara, Laptev and East Siberian seas (from left to right) at $H > 150$ m

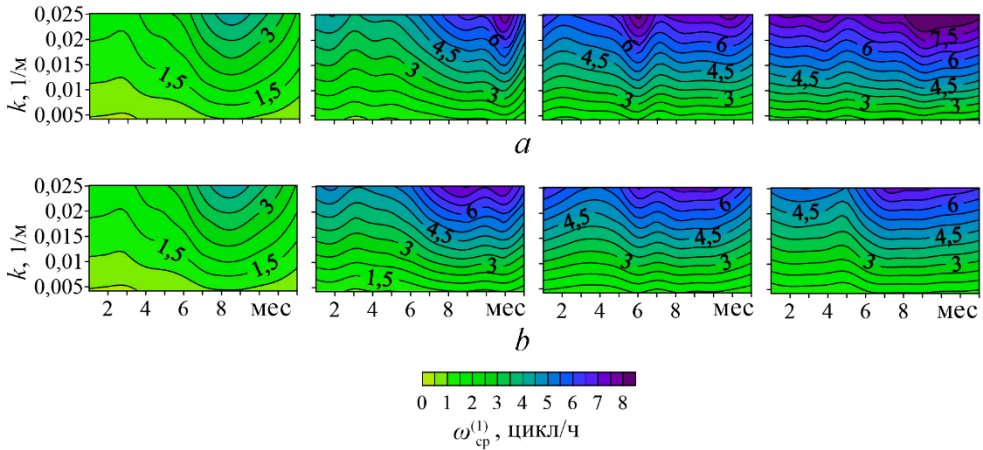


Рис. 9. Внутригодовая изменчивость осредненных дисперсионных зависимостей первой моды ВВ в морях Баренцевом, Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском (слева направо): *a* – при $H > 150$ м; *b* – для всей акватории
Fig. 9. Intra-annual variability of the averaged dispersion dependences of the IW first mode in the Barents, Kara, Laptev and East Siberian seas (from left to right): *a* – at $H > 150$ m; *b* – for the entire water area

На рис. 9 показана внутригодовая изменчивость осредненных дисперсионных кривых первой моды ВВ в интервале длин волн 250–1500 м, рассчитанных для глубоководной области (рис. 9, *a*) и всей площади моря (рис. 9, *b*). Осредненные дисперсионные зависимости для Баренцева моря практически одинаковы, потому что области глубин с $H < 150$ м здесь значительно меньше, чем в трех других морях. Для морей Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского

есть незначительные расхождения в коротковолновой области. Максимальные осредненные собственные частоты ВВ в Баренцевом море в несколько раз меньше, чем в других морях.

Заключение

На основе данных реанализа *World Ocean Atlas 2018* о температуре и солености выполнен анализ вертикальной структуры и дисперсионных свойств свободных внутренних волн, дана оценка связи их характеристик с распределением частоты Вэйсяля – Брента по глубине в морях Баренцевом, Карском, Лаптевых и Восточно-Сибирском.

Показано, что наиболее интенсивная динамика внутренних волн наблюдается в Баренцевом море. Благодаря влиянию Атлантического океана вертикальные градиенты плотности в Баренцевом море невелики, а амплитуда вертикальной составляющей волновой скорости значительно превосходит $W(z)$ в других морях. Области наибольших значений амплитуды вертикальной составляющей скорости совпадают с районами наименьших градиентов плотности (центральные и северные районы морей). Коэффициент корреляции по акваториям морей между максимумом частоты плавучести по глубине и максимумом амплитуды вертикальной составляющей скорости находится в диапазоне $-0,47 \dots -0,77$, коэффициент корреляции между глубинами их залегания – в диапазоне $0,23-0,78$.

Осредненная по акватории моря глубина залегания максимума амплитуды вертикальной составляющей скорости ВВ в Баренцевом и Карском морях составляет ~ 90 м в середине зимы и $\sim 75-80$ м летом, в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском ~ 60 м в течение всего года. Осредненные глубины залегания максимума частоты Вэйсяля – Брента меньше, чем осредненные глубины залегания максимума амплитуды вертикальной составляющей скорости.

В месяцы максимальных градиентов плотности наблюдаются самые высокочастотные и самые короткопериодные внутренние волны. Максимальная устойчивость вод в Баренцевом море наступает в июле – августе, в Карском море – в июле – сентябре и ноябре, в море Лаптевых – в июне и ноябре, в Восточно-Сибирском море – в июле. В эти же месяцы наблюдаются максимальные значения осредненных собственных частот, минимальные значения осредненных собственных периодов и амплитуд вертикальной составляющей скорости внутренних волн. Модуль коэффициента корреляции между осредненными по акваториям морей максимумами частоты Вэйсяля – Брента и значениями собственных частот, периодов и амплитуд вертикальных скоростей превышает $0,9$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Morozov E. G.* Oceanic Internal Tides: Observations, Analysis and Modeling. A Global View. Springer International Publishing, 2018. 304 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-73159-9>
2. Поверхностные и внутренние волны в арктических морях / Под ред. И. В. Лавренова, Е. Г. Морозова. СПб. : Гидрометеиздат, 2002. 362 с.
3. *Морозов Е. Г., Пака В. Т.* Внутренние волны в высокоширотном бассейне // Океанология. 2010. Т. 50, № 5. С. 709–715.

4. Внутренние волны на склоне желоба острова Медвежий по данным эксперимента «Полярный фронт Баренцева моря (BSPF-92)» / Г. И. Козубская [и др.] // *Океанология*. 1999. Т. 39, № 2. С. 165–173.
5. World Ocean Atlas 2018. Volume 1: Temperature // R. A. Locarnini [et al.] ; Techn. ed. A. Mishonov. Silver Spring, MD : U.S. Department of Commerce, 2019. 52 p. (NOAA Atlas NESDIS ; No. 81). URL: https://www.ncei.noaa.gov/sites/default/files/2021-03/woa18_vol1.pdf (date of access: 31.10.2021).
6. World Ocean Atlas 2018. Volume 2: Salinity / M. M. Zweng [et al.] ; A. Mishonov (technical ed.). Silver Spring, MD : U.S. Department of Commerce, 2019. 50 p. (NOAA Atlas NESDIS ; No. 82). URL: https://www.ncei.noaa.gov/sites/default/files/2020-04/woa18_vol2.pdf (date of access: 31.10.2021).
7. *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.
8. *Краусс В.* Внутренние волны. Л. : Гидрометеиздат, 1968. 272 с.
9. *Миропольский Ю. З.* Динамика внутренних гравитационных волн в океане. Л. : Гидрометеиздат, 1981. 302 с.
10. *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.
11. Трансформация бризера внутренних волн первой моды над вертикальным уступом в трехслойной жидкости / П. В. Лобовиков [и др.] // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55, № 6. С. 182–193. <https://doi.org/10.31857/S0002-3515556182-193>
12. *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: 29.10.2021).
13. *Тимофеев В. Т.* Устойчивость вод Баренцева моря // *Проблемы Арктики*. Л. : Изд-во Главсевморпути, 1946. Вып. 3. С. 5–37.
14. *Букатов А. А., Павленко Е. А., Соловей Н. М.* Региональные особенности распределения частоты Вьяйсяля – Брента в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 5. С. 437–448. doi:10.22449/0233-7584-2019-5-437-448
15. *Добровольский А. Д., Залогин Б. С.* Моря СССР. М. : Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
16. *Доронин Ю. П., Хейсин Д. Е.* Морской лед. Л. : Гидрометеиздат, 1975. С. 8–12.

Об авторах:

Букатов Антон Алексеевич, ведущий 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