

Особенности среднеклиматических характеристик внутренних волн в Японском море на основе атласа WOA18

М. В. Кокоулина^{1, 2}, О. Е. Куркина¹, Т. Г. Талипова^{2, 3},
А. А. Куркин^{1, 2, ✉}, Е. Н. Пелиновский^{2, 3, 4}

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,
Нижний Новгород, Россия

² Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН,
Владивосток, Россия

³ Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия

⁴ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия
✉ aakurkin@gmail.com

Поступила в редакцию 18.03.2023; одобрена после рецензирования 18.04.2023;
принята к публикации 05.07.2023.

Аннотация

Цель. Создание атласа, состоящего из набора карт кинематических и нелинейных параметров внутренних волн в Японском море, позволяющих выполнить зонирование акватории по возможным типам волн и определить полярности и предельные амплитуды генерируемых уединенных волн, – цель настоящей работы.

Методы и результаты. На основе гидрологических данных для среднесезонных сезонов из климатологического атласа WOA18 рассматриваются сезонные особенности плотностной стратификации вод Японского моря и связанные с ними определяемые средой кинематические и нелинейные параметры внутренних волн. Для этого строятся численные решения линейной краевой задачи для внутренних волн, в результате для каждой расчетной точки определяются фазовая скорость волн низшей моды и вертикальная структура (мода) волновых полей, а на их основе численно строятся остальные характеристики – параметр дисперсии, параметры квадратичной и кубической нелинейности, позволяющие классифицировать локализованные неизлучающие внутренние волны.

Выводы. Атлас предназначен как для экспресс-оценок характеристик внутренних волн, прогноза возможных сценариев их генерации и трансформации, так и для более детального моделирования их распространения. Полученные оценки также могут использоваться для анализа влияния внутренних волн на распространение акустических сигналов в толще вод, перераспределение взвешенных частиц, включая питательные вещества и живые организмы, транспорт донных наносов.

Ключевые слова: стратификация плотности, внутренние волны, Японское море

Благодарности: работа выполнена при поддержке лаборатории нелинейной гидрофизики и природных катастроф ТОИ им. В. И. Ильичева ДВО РАН, грант Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2022-1127 от 01.07.2022 г.).

Для цитирования: Особенности среднеклиматических характеристик внутренних волн в Японском море на основе атласа WOA18 / М. В. Кокоулина [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 5. С. 599–616. EDN ZNQCXA.

Average Climatic Characteristics of Internal Waves in the Sea of Japan Based on the WOA18 Atlas

M. V. Kokoulina^{1, 2}, O. E. Kurkina¹, T. G. Talipova^{2, 3},
A. A. Kurkin^{1, 2, ✉}, E. N. Pelinovsky^{2, 3, 4}

¹ Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

² V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

³ A. V. Gaponov- Grekhov Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

⁴ HSE University, Moscow, Russia
✉ aakurkin@gmail.com

Abstract

Purpose. The study is aimed at constructing the atlas, or a set of charts, for kinematic and nonlinear parameters of internal waves of the lowest mode in the Sea of Japan for mapping the region according to possible wave forms, and for determining polarities (elevation or depression) and limiting amplitudes of solitary internal waves.

Methods and Results. Based on hydrological data for the long-term average seasons derived from the climatological atlas WOA18, the seasonal features of density stratification of the Sea of Japan waters and the related kinematic and nonlinear parameters of internal waves governed by the environment are considered. For this purpose, the numerical solutions of a linear boundary value problem for internal waves are constructed that results in determining the wave phase velocities and the vertical structure (mode) of the wave fields for each calculation point. This basis allows numerical construction of the remaining characteristics, namely, the dispersion parameter, the quadratic and cubic nonlinearity parameters which make it possible to classify the localized non-radiating internal waves.

Conclusions. The atlas is intended both for express assessing the internal wave characteristics, forecasting possible scenarios of their generation and transformation, and for more detailed modeling of their propagation. The estimates obtained can also be used to analyze the effect of internal waves on the propagation of acoustic signals in the water column, the redistribution of suspended particles including nutrients and living organisms, and the transport of bottom sediments.

Keywords: density stratification, internal waves, Sea of Japan

Acknowledgements: The work was supported by the Laboratory of Nonlinear Hydrophysics and Natural Disasters of the V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB of RAS, grant of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (agreement No. 075-15-2022-1127 dated July 1, 2022).

For citation: Kokoulina, M.V., Kurkina, O.E., Talipova, T.G., Kurkin, A.A. and Pelinovsky, E.N., 2023. Average Climatic Characteristics of Internal Waves in the Sea of Japan Based on the WOA18 Atlas. *Physical Oceanography*, 30(5), pp. 563-580.

Введение

Внутренние волны, существование которых обусловлено плотностной дифференциацией водных слоев в толще океана, ответственны за многие происходящие в океане процессы. В их число входит перемешивание океанических вод, транспорт растворенных веществ и взвешенных частиц, влияние на поверхностное волнение. Внутренние волны играют большую роль в функционировании экосистем, в частности планктонных [1], считаются ответственными за размывы оснований морских платформ и за гибель подводных лодок, они также сильно искажают акустические сигналы, распространяющиеся

600

в море [2–5]. Наиболее опасными для подводных аппаратов и сооружений считаются внутренние волны большой амплитуды, которые часто имеют солитоноподобные формы разных полярностей и разных мод, в основном первой и второй моды ¹ [6–8]. Иногда крутой фронт внутренней волны распадается на цепочку солитонов (солибор), которые часто встречаются на шельфах, например, Японского моря [9]. Также в стратифицированных водах океана встречаются довольно компактные пакеты внутренних волн, по форме напоминающие хорошо известные в физике бризеры [7, 10].

При исследовании внутренних волн в первую очередь рассматривается стратификация вод акватории, как плотностная, так и сдвиговое течение. Для того чтобы оценить влияние стратификации на параметры внутренних волн в море в целом, обычно используют известные наборы данных с усредненными гидрологическими полями. Выделение таких характеристик, как значение максимальной частоты Вэйсяля – Брента, а также глубина залегания этого максимума, может многое дать в понимании поведения внутренних волн при их распространении. Карты значений максимума частоты Вэйсяля – Брента и карты глубины его залегания для Балтийского, Средиземного, Южно-Китайского и Охотского морей, построенные авторами ранее, приведены в работах [11–14]. В Японском море, как и во всех морях Тихого океана, основной причиной генерации внутренних волн является баротропный прилив, хотя внутренние волны распространяются и в бесприливных морях – Средиземном, Черном, Балтийском, Каспийском, в достаточно больших озерах и водохранилищах [15, 16].

Наиболее опасны и интересны внутренние волны умеренных и больших амплитуд (20–100 и более метров в смещении изопикны), которые в основном носят нелинейный характер. Частая встречаемость в шельфовых зонах еще раз подтверждает необходимость их изучения. Вышеупомянутые идентифицируемые формы нелинейных внутренних волн и их эволюция в стратифицированном океане хорошо описываются стационарными решениями уравнения Гарднера [17], полученного из уравнений Эйлера для вертикально-стратифицированной жидкости в приближении слабонелинейных и слабодисперсионных волн. Построенная на основе уравнения Гарднера модель динамики внутренних волн дает возможность на основе ее параметров провести экспресс-оценки типов стационарных волн, описание их эволюции и возможных амплитуд.

Данная работа посвящена описанию географических особенностей плотностной стратификации Японского моря, ее изменчивости по сезонам как фона для развития процессов, связанных с внутренними волнами, а также карт кинематических параметров внутренних волн, построенных на основе среднеклиматических гидрологических данных.

В качестве исходных данных для построения карт параметров внутренних волн в рамках уравнения Гарднера для горизонтально-неоднородной среды использован цифровой климатологический атлас с открытым исходным кодом *World Ocean Atlas 2018 (WOA18)*, куда интегрирована обобщенная и стандартизированная информация об основных особенностях гидрофизических параметров морской воды и их сезонных изменениях. Он содержит массивы усредненных и сглаженных данных натуральных измерений температуры, солености

¹ Internal solitons in the ocean / J. R. Apel [et al.]. Woods Hole, 2006. 110 p. (Woods Hole Oceanographic Institution Technical Report ; WHOI-2006-04). doi:10.1575/1912/1070

и других гидрологических параметров². Данные WOA18 используются на регулярной сетке с разрешением 5°, 1° или 1/4° и представляют собой вертикальные профили температуры и солёности, усредненные за среднеклиматические год, сезон и месяц на 137 вертикальных уровнях. Мы использовали данные солёности и температуры за летний и зимний периоды, на основе которых с помощью уравнения состояния морской воды TEOS10 (<http://teos-10.org/>) восстановлена ее потенциальная плотность и вычислена частота Вьяйсяля – Брента.

Стратификация вод Японского моря

Японское море – полузамкнутое окраинное море Тихого океана, относящееся к наиболее крупным и глубоким морям мира. Одной из особенностей в общем теплого Японского моря является поступление холодной воды через Татарский пролив в мае – июне вследствие таяния льдов в холодном Охотском море. Поэтому, особенно в летний период, стратификации северной и южной частей Японского моря должны сильно отличаться друг от друга. Карта региона Японского моря с достаточно подробной батиметрией показана на рис. 1.

В настоящей работе приводятся карты особенностей стратификации плотности вод Японского моря, рассчитанные по усредненным данным за летний и зимний периоды с целью показать максимальную разницу в стратификации. Эти и другие карты составлены с использованием программного обеспечения *Ocean Data View*³. Построенные карты и гистограммы опираются на реперные точки из атласа WOA18².

Для анализа плотностной стратификации морской воды с точки зрения ее влияния на параметры поля возможных внутренних гравитационных волн были построены карты максимальных значений частоты Вьяйсяля – Брента (частоты плавучести) N_{\max} и карты глубины залегания максимума этой величины по всему Японскому морю для зимнего и летнего сезонов. Эти карты демонстрируют (рис. 2, 3), что плотностная стратификация Японского моря существенно зависит от сезона. Так, летом происходит заметное увеличение (до 4 раз) значений N_{\max} по сравнению с зимним периодом вместе с одновременным уменьшением глубины залегания пикноклина, когда максимум частоты Вьяйсяля – Брента стремится к значению 0,04 с⁻¹. Этот достаточно большой максимум присущ почти всей центральной и юго-западной акватории Японского моря. Зимой он опускается до 0,01 с⁻¹ практически по всей акватории моря, лишь немного подрастая до 0,017 с⁻¹ у берегов о. Хонсю. Соответственно гистограммы, построенные для N_{\max} , показывают широкий разброс летом (0,017–0,04 с⁻¹ с наиболее вероятным значением 0,032 с⁻¹) и узкое распределение зимой (0,002–0,02 с⁻¹ с наиболее вероятным значением 0,07 с⁻¹). Следует отметить, что зимой наибольшие значения максимума частоты плавучести группируются на юго-востоке моря, у побережья о. Хонсю и практически в береговой зоне залива Петра Великого, а также у м. Шульца. Летом же у побережья о. Хонсю они меньше, чем у юго-западного берега моря.

² World Ocean Atlas 2018: Product of Documentation / T. P. Boyer [et al.]. NOAA National Centers for Environmental Information, 2018. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/archive/accession/NCEI-WOA18> (date of access: 21.05.2023).

³ URL: <https://odv.awi.de> (date of access: 04.10.2023).

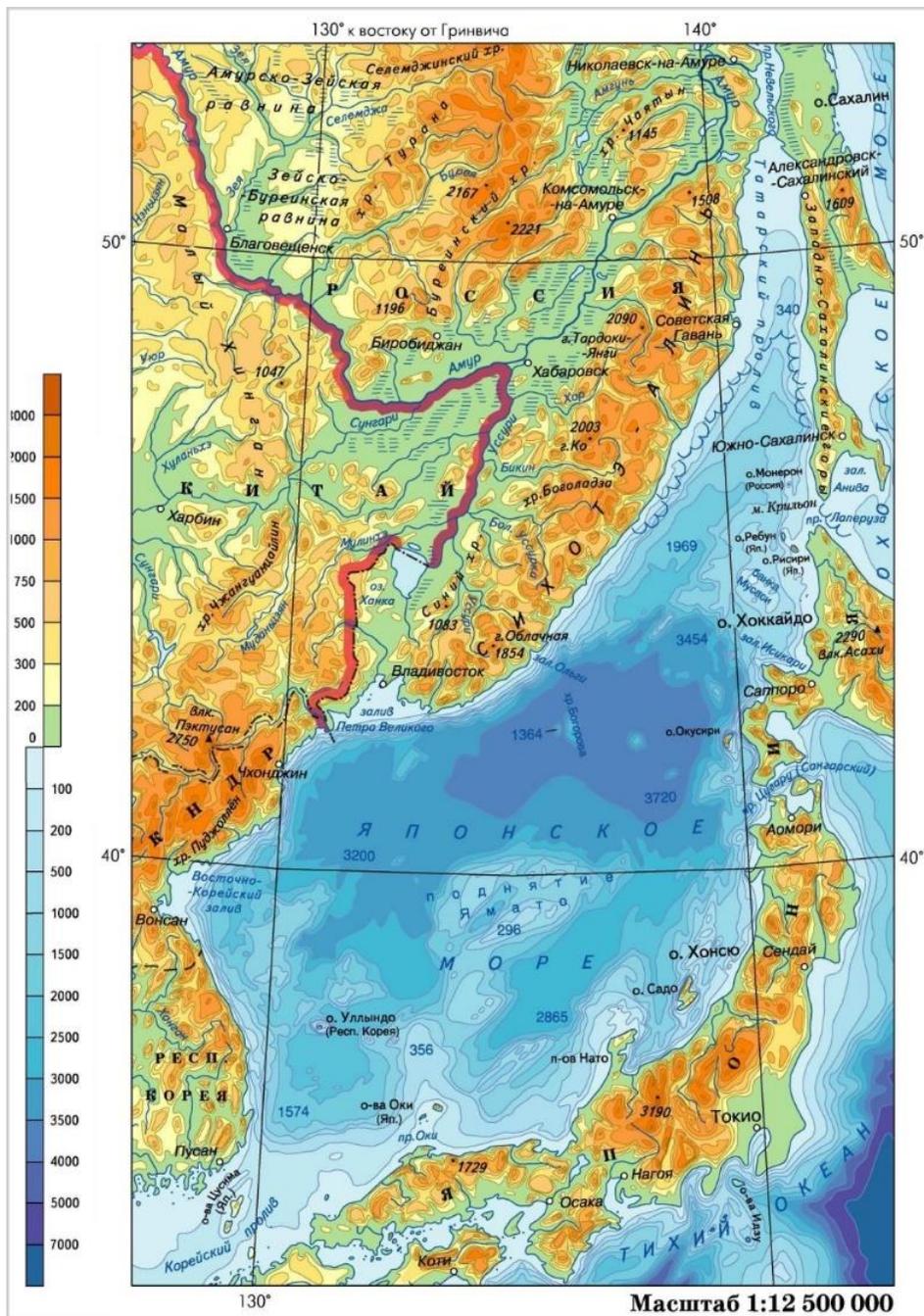
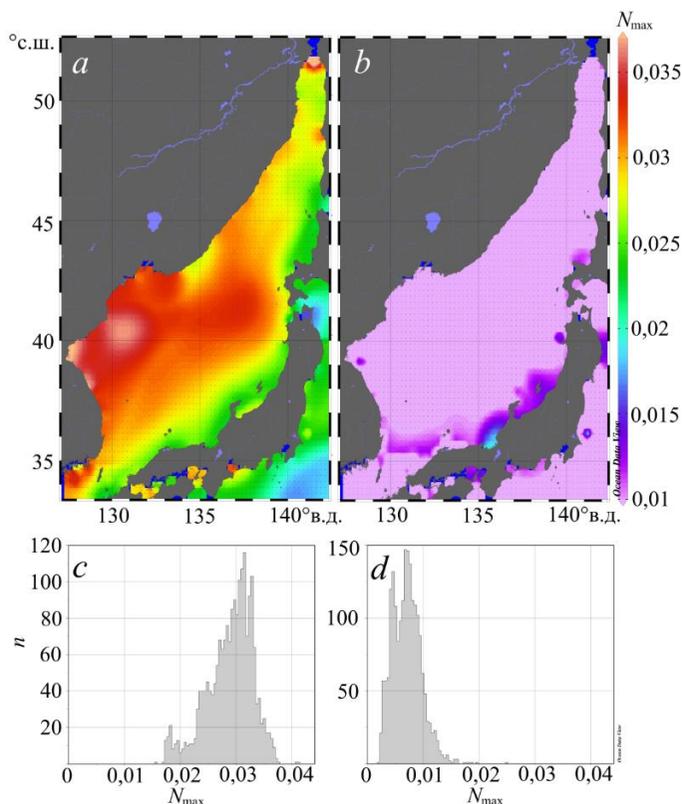


Рис. 1. Физическая карта Японского моря ⁴
Fig. 1. Physical map of the Sea of Japan ⁴

⁴ Национальный атлас России в четырех томах. Т. 2 : Природа и экология. Москва : ФГУП «ГОСГИСЦЕНТР», 2004. 495 с. URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/294-296.html> (дата обращения: 30.08.2023).

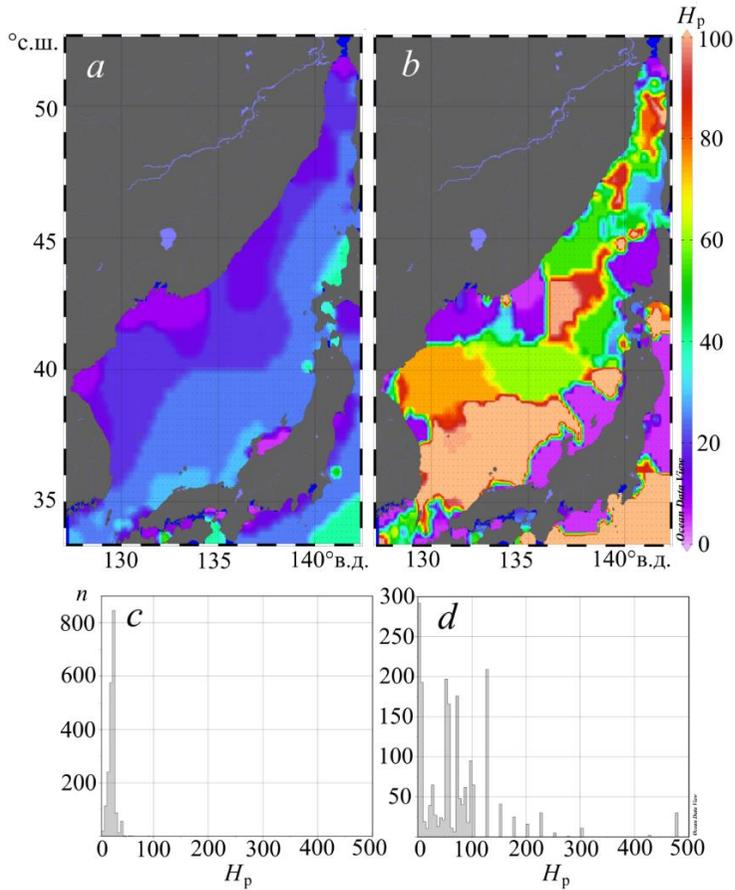


Р и с. 2. Пространственное распределение максимальных значений частоты Вьяйсяля – Брента (с^{-1}) в профиле плавучести – *a, b* и гистограммы их распределения (n – количество точек со значениями N_{max} в выбранном интервале, весь диапазон значений делится на 100 интервалов, всего 1957 точек) – *c, d*. Здесь и далее на всех рисунках слева – данные для лета, справа – для зимы

Fig. 2. Spatial distribution of the maximum values of the Brunt – Väisälä frequency (s^{-1}) in the buoyancy profile – *a, b* and histograms of their distribution (n is the number of points with the N_{max} values in the selected interval, the entire range of values is divided into 100 intervals, 1957 points in total) – *c, d*. Here and below in all the figures, the left panel shows the data for a summer season, the right one – for a winter season

Глубины залегания N_{max} (рис. 3) летом при прогреве меняются в основном в диапазоне 7–35 м: на западном шельфе моря глубина залегания максимума составляет 15–20 м, плавно сдвигаясь к 7–10 м в прибрежной зоне, а в юго-восточной зоне она достигает 30–35 м, особенно у южного берега; у южного побережья о. Хоккайдо она составляет 45 м, здесь глубоко прогретое море и выделен основной пикноклин.

Зимой карта горизонта залегания N_{max} имеет ярко выраженные зоны однородных глубин. Это определяется как батиметрией (выделено плато Ямато), так и другими географическими условиями (впадение рек, течения и пр.). Летом, как видно из рис. 3, *c*, распределение глубины залегания N_{max} очень узкое (0–35 м), зимой – очень широкое. Основная глубина здесь – у поверхности моря, но сравнимые максимумы в гистограмме достигаются на глубинах 50, 70 и 120 м.



Р и с. 3. Карты глубин залегания (H_p , м) максимальной частоты плавучести – *a, b* и гистограммы их распределения – *c, d*
F i g. 3. Maps of the depths (H_p , m) of buoyancy frequency maxima – *a, b*, and histograms of their distribution – *c, d*

Теоретическая модель уединенных внутренних волн

Применяемая в наших исследованиях модель эволюции внутренних волн основана на уравнении Гарднера [17], она верифицировалась на натуральных данных (см., напр., [18]) и неплохо описывает распространение длинных нелинейных внутренних волн. Уравнение Гарднера имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + (c + \alpha \eta + \alpha_1 \eta^2) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \beta \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} = 0, \quad (1)$$

а в системе отсчета, движущейся со скоростью длинной внутренней волны (c),

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + (\alpha \eta + \alpha_1 \eta^2) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \beta \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} = 0. \quad (2)$$

В обоих уравнениях η – смещение изопикны в максимуме модовой функции Φ , которая находится из задачи Штурма – Лиувилля:

$$\frac{d}{dz} \left((c_n - U)^2 \frac{d\Phi_n}{dz} \right) + N^2(z) \Phi_n = 0, \quad \Phi_n(0) = \Phi_n(H) = 0, \quad n = 1, 2, 3,$$

где c_n – собственные числа, соответствующие линейным скоростям распространения внутренних волн разных мод; Φ_n – собственные модовые функции; $N(z)$ – частота Вейселя – Брента, или частота плавучести; $U(z)$ – скорость сдвигового течения. Условия нормировки для низшей моды: $\Phi_{1\max} = \Phi(z_{\max}) = 1$ (об условиях нормировки второй и более высоких мод см. [13]). Коэффициенты уравнения Гарднера находятся в квадратурах от модовой функции, ее производных и нелинейной поправки к ней, т. е. в конечном счете определяются вертикальной плотностной стратификацией жидкости и скоростью течения [17]. Следует отметить, что коэффициент дисперсии в уравнениях (1), (2) всегда положительный. Но оба коэффициента нелинейности могут менять знак при соответствующих глубинах и стратификациях [17].

Односолитонное решение уравнения (2) имеет вид

$$\eta(x, t) = \frac{A}{1 + B \operatorname{ch}(\gamma(x - Vt))}, \quad (3)$$

$$A = \frac{6\beta\gamma^2}{\alpha}, \quad B^2 = 1 + \frac{6\alpha_1\beta\gamma^2}{\alpha^2}, \quad V = \beta\gamma^2,$$

где γ – произвольный параметр, имеющий смысл обратного масштаба ширины. Также можно записать параметры решения (3) A , B , γ в терминах его амплитуды $a = A/(1+B)$:

$$B = a \frac{\alpha_1}{\alpha} + 1, \quad A = a \left(a \frac{\alpha_1}{\alpha} + 2 \right), \quad \gamma^2 = \alpha a \left(a \frac{\alpha_1}{\alpha} + 2 \right) \frac{1}{6\beta}.$$

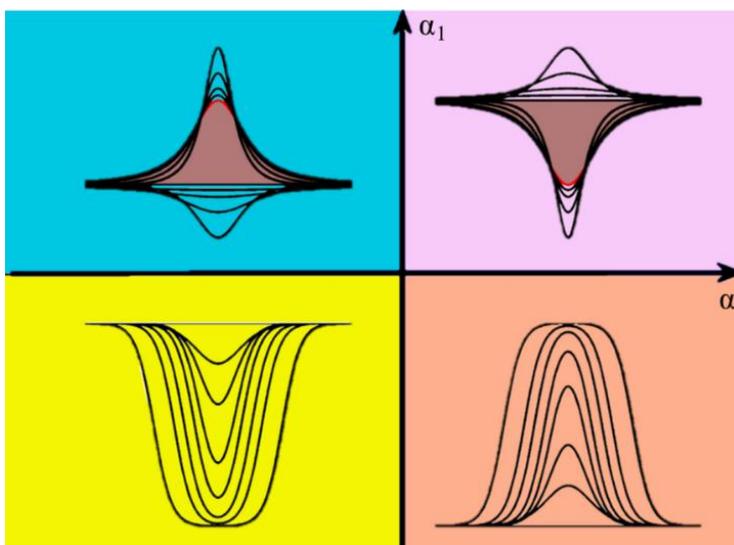
Отметим, что в рамках уравнения Гарднера с отрицательной кубической нелинейностью солитоны имеют полярность, совпадающую по знаку с коэффициентом квадратичной нелинейности, и ограничены по амплитуде амплитудой предельного, или толстого, солитона

$$a_{\text{lim}} = -\alpha/\alpha_1. \quad (4)$$

При положительной кубической нелинейности в рамках уравнения (1) могут существовать солитоны обеих полярностей; только солитоны с амплитудой, противоположной знаку квадратичной нелинейности, не могут иметь амплитуду меньше амплитуды алгебраического солитона

$$a_{\text{alg}} = -2\alpha/\alpha_1. \quad (5)$$

Возможные ветви семейства решений (3) для различных сочетаний знаков коэффициентов квадратичной нелинейности уравнения Гарднера (2) показаны на рис. 4.



Р и с. 4. Возможные типы солитонов на плоскости параметров квадратичной и кубической нелинейности (α , α_1)
Fig. 4. Possible types of solitons on the plane of the quadratic and cubic nonlinearity (α , α_1) parameters

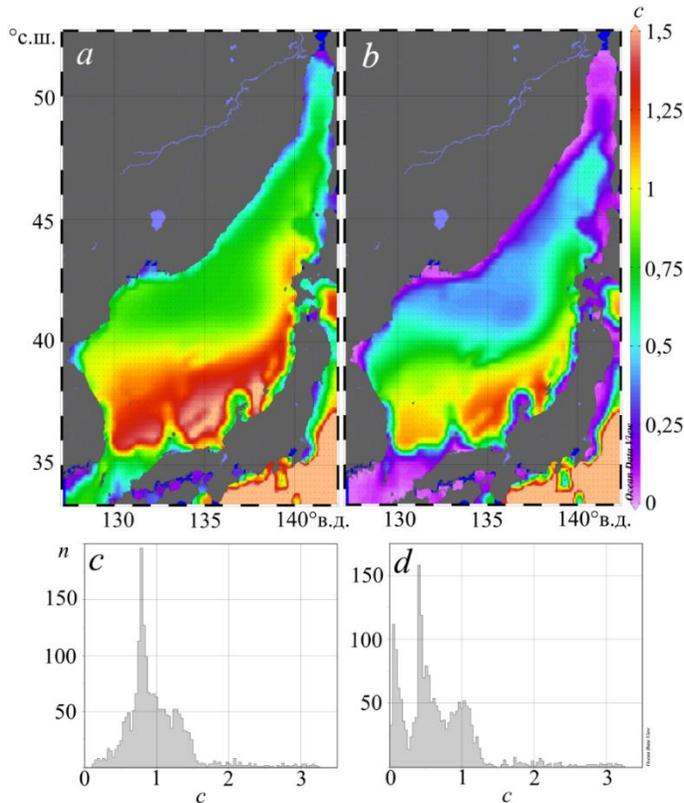
Характеристики упомянутых типов локализованных волн зависят от коэффициентов уравнения Гарднера и в конечном счете – от стратификации. Поэтому важно знать географическое распределение коэффициентов эволюционной модели в исследуемых акваториях для понимания того, волны какого типа могут существовать в той или другой части моря. Для этого нами синтезируются карты параметров внутренних волн.

Атлас кинематических параметров внутренних волн (коэффициентов модели)

Данный атлас включает в себя карту скорости распространения длинных линейных внутренних волн – c , карту квадратичного α и кубического α_1 коэффициентов нелинейности, карту коэффициента дисперсии β . На их основе исследованы возможные формы внутренних солитонов в Японском море.

Карты параметров модели далее приводятся только для низшей, основной, моды. Карты линейных параметров внутренних волн – c и β – представлены на рис. 5, a , b и 6, a , b соответственно. Их сезонные изменения здесь достаточно контрастны, скорость и дисперсия волн летом всюду выше, чем зимой, хотя основные особенности их географического распределения не изменяются от сезона к сезону. Эти параметры в Мировом океане определяются в основном батиметрией, но для Японского моря это не так. Основная глубина более 3 км здесь лежит в котловине в северной части моря, а максимальных значений линейные параметры достигают в южной части, в зоне с более ярко выраженной стратификацией. Летом в северо-западной части моря скорость внутренних волн не превышает $0,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, а в юго-восточной она в два раза больше и достигает $1,6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$; зимой в северо-западной части моря скорость меняется в диапа-

зоне $0,2-0,4 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, в то время как на юго-востоке максимум скорости по-прежнему высок и достигает $1,3 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Гистограммы скорости распространения длинных внутренних волн показаны на рис. 5, *c, d*. Хотя разброс скоростей летом и зимой одинаков, пик наиболее часто встречающихся значений соответствует скорости $0,85 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ летом и скоростям $0,2$ и $0,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ (два пика) зимой.



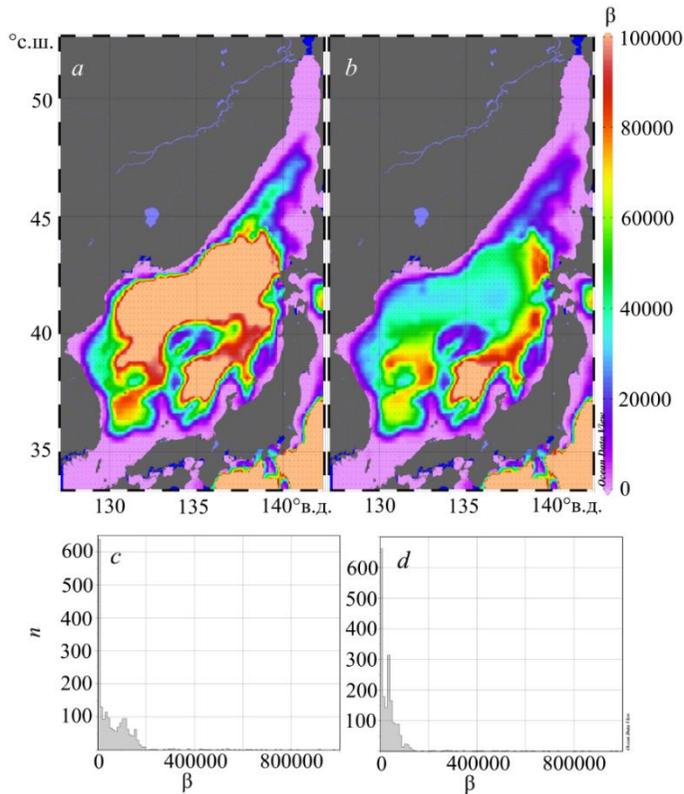
Р и с. 5. Карты скоростей распространения ($c, \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$) длинных внутренних волн низшей линейной моды – *a, b* и гистограммы их распределения – *c, d*

F i g. 5. Maps of the propagation speeds ($c, \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) for long linear internal waves of the lowest mode – *a, b*, and histograms of their distribution – *c, d*

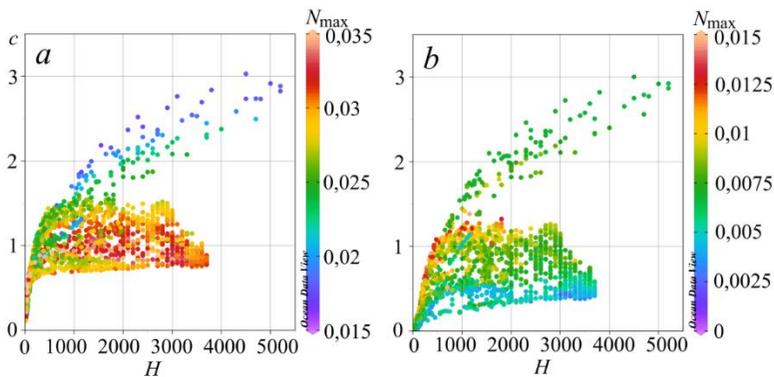
На рис. 7, *a, b* показана корреляция фазовой скорости с глубиной моря летом и зимой соответственно. Здесь отчетливо выделяются по две ветви параметров скорости, ветвь меньших значений соответствует точкам Японского моря, а верхняя ветка – немногим точкам Тихого океана, которые при вырезании данных из атласа по прямоугольной области невольно попадают в обработку.

Рисунок 7 убедительно показывает отсутствие зависимости скорости распространения длинных внутренних волн от глубины свыше 200 м для Японского моря, хотя такая зависимость с небольшим разбросом прослеживается

для ветки Тихого океана. Также для значений c в Японском море зимой характерна прямая корреляция с максимумом частоты Вэйсяля – Брента, хотя для летнего сезона такой зависимости не наблюдается.



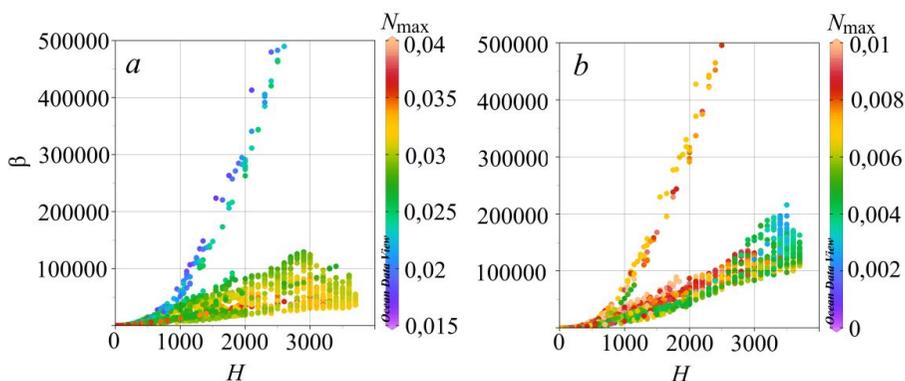
Р и с. 6. Значения параметра дисперсии (β , $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$) длинных внутренних волн низшей линейной моды – *a, b* и гистограммы их распределения – *c, d*
F i g. 6. Values of the dispersion parameter (β , $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) of long linear internal waves of the lowest mode – *a, b*, and histograms of their distribution – *c, d*



Р и с. 7. Скорость распространения длинных внутренних волн (c , $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$) в зависимости от глубины моря (H , м)
F i g. 7. Propagation speed of long linear internal waves (c , $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) depending on the sea total depth (H , m)

Параметр дисперсии (рис. 6) в центральной и южной частях Японского моря также сильно зависит от сезона. Его максимальное значение летом и зимой составляет $\sim 10^5 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, но летом эти значения занимают гораздо большую площадь.

Для коэффициента дисперсии связь с глубиной моря чуть более выражена, чем для скорости распространения волны, особенно в зимнее время. Это хорошо видно на рис. 8, *a, b* (нижнее облако точек) для летнего и зимнего сезонов соответственно. Верхняя ветвь на двух фрагментах соответствует данным по Тихому океану. Для зимнего сезона в зонах глубин 1000–2500 м видна зависимость значений коэффициента дисперсии от N_{\max} . На рис. 6, *a, b* зимой и летом четко выделяется поднятие Ямато. В северной зоне моря (южная часть Татарского пролива) коэффициент дисперсии слабо меняется от лета к зиме, остаются та же топология и почти те же значения, $\sim 5 \cdot 10^3 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$. Зимой высоким значением коэффициента дисперсии выделяется зона у о. Окусири, где расположена котловина; летом же значения коэффициента дисперсии выше зимних, но они примерно одинаковы вокруг плато Ямато в центральной части моря. Зона котловины летом не выделена. Тем не менее в среднем в южной части моря значения коэффициента дисперсии выше, чем в центральной и северной частях.



Р и с. 8. Коэффициент дисперсии (β) в зависимости от глубины моря (H , м)
F i g. 8. Dispersion parameter (β) depending on the sea total depth (H , m)

Карты коэффициента квадратичной нелинейности (α) показаны на рис. 9. Этот параметр очень чувствителен к сезону, т. е. к стратификации воды. По гистограммам значений α можно видеть, что летом в основном этот параметр отрицательный и достигает значений в диапазоне $-0,03 \dots 0,01 \text{ с}^{-1}$. Однако у берегов есть области с положительным коэффициентом, хотя их довольно мало. Они расположены у о. Хоккайдо, побережья Северной Кореи и п-ова Гамова.

В результате прогревания верхних слоев воды и потока пресной воды (вследствие таяния вод в Охотском море) в Японском море возникает заметный сезонный летний пикноклин. Ближе к зиме, когда и нагрев, и поток пресной воды прекращается, этот пикноклин слабо выражен, тогда основную роль в формировании знака коэффициента квадратичной нелинейности играет положение основного пикноклина, который, особенно в шельфовой зоне, прижат

ко дну, поскольку там находится более соленая вода. Поэтому зимой коэффициент квадратичной нелинейности меняет знак на заметной площади моря. Гистограммы, приведенные на рис. 9, *c*, *d*, показывают значительный разброс коэффициента квадратичной нелинейности летом от $-0,03$ до $0,01$ с^{-1} с широкими максимумами $\sim -0,017$ и $-0,025$ с^{-1} . Зимой разброс значительно меньше, от $0,01$ до $0,01$ с^{-1} с узким высоким максимумом в точке $-0,001$ с^{-1} .

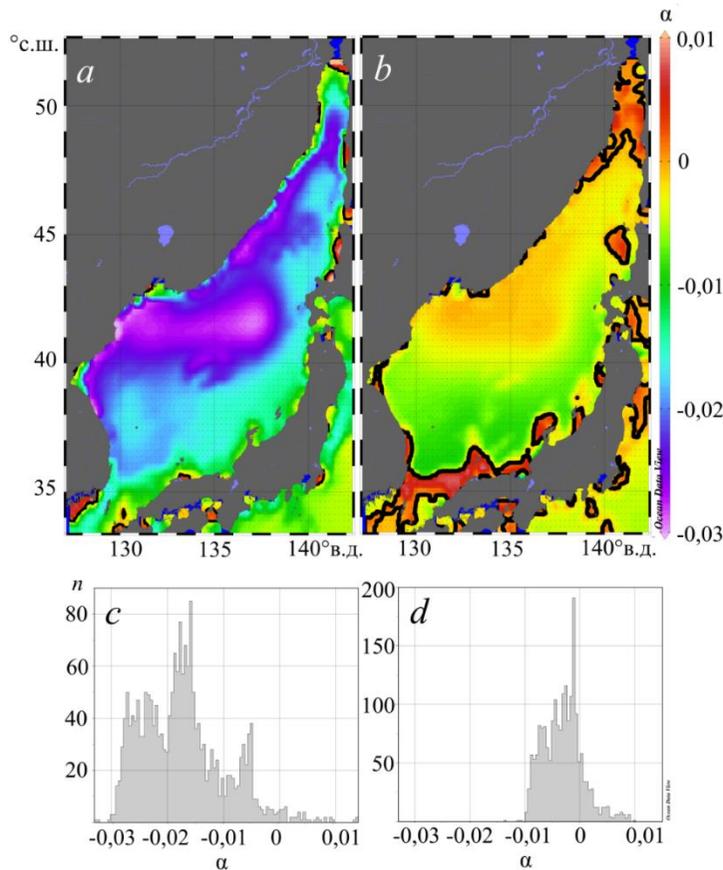
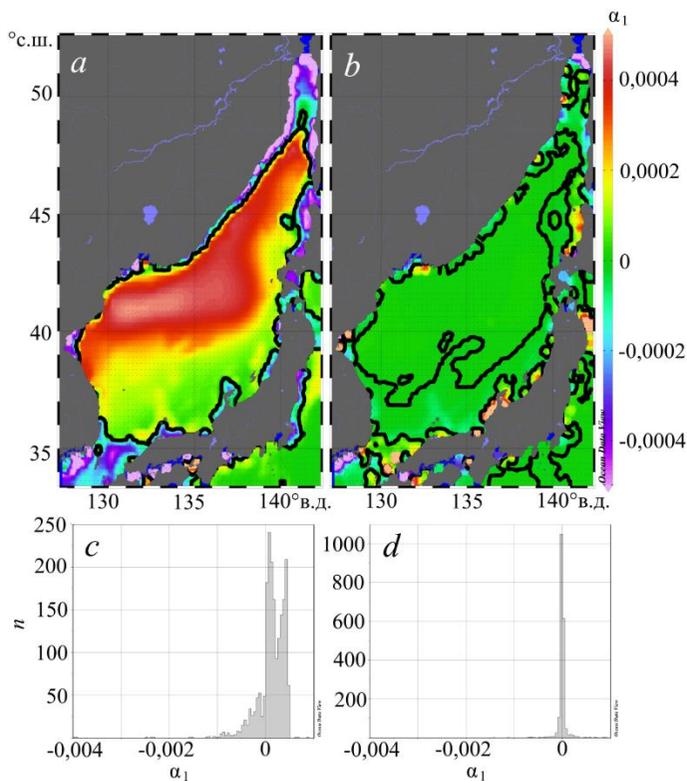


Рис. 9. Карты значений параметра квадратичной нелинейности (α , с^{-1} ; черной жирной линией показана граница смены знака) – *a*, *b* и гистограммы их распределения – *c*, *d*
Fig. 9. Maps of the quadratic nonlinearity parameter values (α , s^{-1} ; the black thick line shows the contour of sign change) – *a*, *b*, and histograms of their distribution – *c*, *d*

Сезонные карты коэффициента кубической нелинейности приведены на рис. 10. Заметим, что летом почти на всей площади Японского моря преобладает заметная положительная кубическая нелинейность, что хорошо видно по летней гистограмме. Как уже предполагалось, летом в формировании стратификации играют роль те же два основных фактора – прогрев воды и приток пресной воды по поверхности вследствие таяния льдов в Охотском море, создающие два пикноклина, причем нижний, состоящий из соленой воды, может быть размытым. Хотя положительный коэффициент кубической нелинейности

летом невелик ($0-0,0005 \text{ (м}\cdot\text{с)}^{-1}$), отдельные выбросы до $0,0017 \text{ (м}\cdot\text{с)}^{-1}$), он может существенно менять динамику внутренних волн также и в северной части Японского моря у российских берегов, в частности у м. Гамова. Зимняя гистограмма демонстрирует очень маленький, практически нулевой коэффициент кубической нелинейности обоих знаков, при этом отрицательные значения преобладают. Черные жирные линии на рис. 10, *a, b* также показывают границу смены знака параметра кубической нелинейности. Гистограммы коэффициента кубической нелинейности (рис. 10, *c, d*) показывают его довольно широкое распределение по акватории Японского моря в диапазоне $-0,0025 \dots 0,001 \text{ (м}\cdot\text{с)}^{-1}$ с одним пиком в точке $0,0001 \text{ (м}\cdot\text{с)}^{-1}$ и соседним пиком в точке $0,0005 \text{ (м}\cdot\text{с)}^{-1}$ в летний сезон и очень узкое распределение в диапазоне $-0,0001 \dots 0,0001 \text{ (м}\cdot\text{с)}^{-1}$ с пиком вблизи нуля зимой.

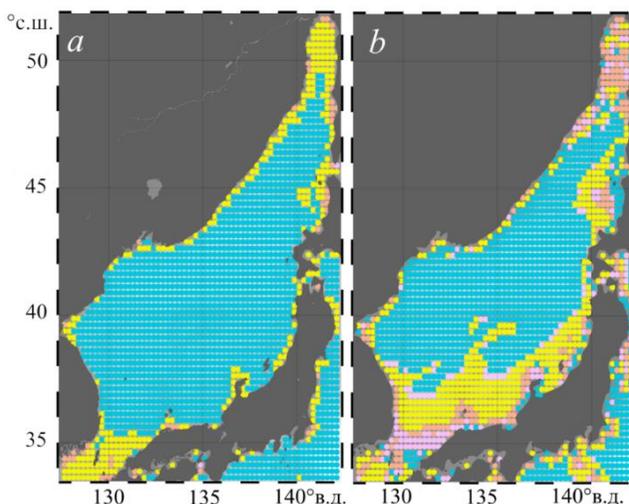


Р и с. 10. Карты значений параметра кубической нелинейности ($\alpha_1, \text{ (м}\cdot\text{с)}^{-1}$) – *a, b* и гистограммы их распределения – *c, d*

F i g. 10. Maps of the cubic nonlinearity parameter values ($\alpha_1, \text{ (m}\cdot\text{s)}^{-1}$) – *a, b*, and histograms of their distribution – *c, d*

По коэффициентам уравнения Гарднера (1) можно определить ветви и предельные амплитуды возможных уединенных солитоноподобных внутренних волн, которые могут появляться в Японском море. Классификация солитонов Гарднера показана на рис. 4. Как уже упоминалось, если коэффициент кубической нелинейности α_1 в уравнении (1) отрицательный, то солитоны по абсо-

лютной величине ограничены сверху модулем амплитуды (формула (4)) толстого, или столообразного, солитона (рис. 4, нижняя полуплоскость). Если коэффициент кубической нелинейности положительный (рис. 4, верхняя полуплоскость), то солитоны, полярность которых противоположна знаку параметра квадратичной нелинейности α , ограничены по абсолютной величине снизу модулем амплитуды (формула (5)) алгебраического солитона.



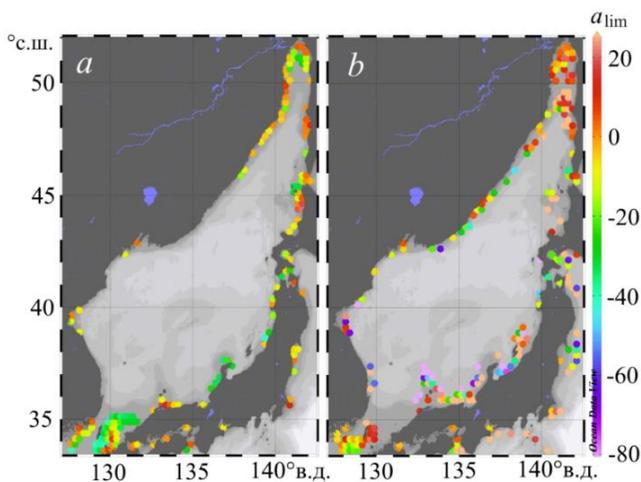
Р и с. 11. Распределение возможных типов солитонов (обозначены цветом соответственно рис. 4) летом – *a* и зимой – *b*

Fig. 11. Distribution of possible soliton types (marked in the same colors as in Fig. 4) in summer – *a* and in winter – *b*

На рис. 11 видно, что и зимой, и летом на основной части моря преобладают солитоны из второго (голубого) квадранта, т. е. солитоны уравнения Гарднера с положительным кубическим и отрицательным квадратичным параметрами нелинейности. На самом деле, поскольку коэффициент кубической нелинейности в центральной части моря достаточно мал, особенно зимой, это должны быть практически солитоны уравнения Кортевега-де-Вриза отрицательной полярности. Солитоны положительной полярности (с амплитудой, большей амплитуды алгебраического солитона) здесь возможны только с амплитудой больше 15–20 м летом, что, конечно, вполне реализуемо, и ~ 200 м зимой, что выходит за пределы применимости слабонелинейной теории для Японского моря.

Рисунок 12 иллюстрирует характер распределения предельных амплитуд для толстого солитона, a_{lim} (формула (4)), при отрицательных значениях коэффициента кубической нелинейности α_1 . Для условий Японского моря рассчитанные значения предельных амплитуд – a_{lim} (формула (4)) и a_{alg} (формула (5)) – оказываются в подавляющем большинстве точек огромными по величине, что говорит о нереализуемости этих ограничений, а при положительной кубической нелинейности – о нереализуемости ветви решений с алгебраическим солитоном. Реальными амплитудами для толстого солитона представляются амплитуды < 100 м (но не превышающие физическую высоту всего

столба воды, т. е. полную глубину моря). Толстые солитоны обеих полярностей с такими амплитудами теоретически могут встречаться в южной части Татарского пролива и в прибрежных зонах, а также в проливе между берегом Южной Кореи и о. Хонсю. И в зимний, и в летний период такие солитоны возможны только в прибрежных зонах, причем зимой точек, где работает это ограничение, больше, чем летом, и предельные амплитуды широкого солитона зимой оказываются по модулю больше, чем летом.



Р и с. 12. Карты значений предельной амплитуды толстого солитона, $a_{\text{lim}} = -\alpha/\alpha_1$ (м), летом – *a* и зимой – *b*

F i g. 12. Maps of the limiting amplitude ($a_{\text{lim}} = -\alpha/\alpha_1$ (m)) values for a thick soliton in summer – *a* and in winter – *b*

Заклучение

На основе имеющихся данных международного гидрологического атласа WOA18 рассчитаны и представлены в виде атласа географических карт особенности плотностной стратификации вод, кинематические параметры и предельные амплитуды внутренних волн для Японского моря. Показано, что максимум частоты Вайсяля – Брента и глубина его залегания существенно зависят от сезона. Эти параметры в свою очередь дают представление о выраженности динамики внутренних волн. Наиболее сильная вертикальная стратификация плотности вод Японского моря ожидаемо наблюдается летом и осенью. Соответственно, и кинематические параметры внутренних волн наиболее значительны в летне-осенний период. Показано, что такие линейные параметры, как скорость распространения длинных внутренних волн и коэффициент дисперсии, для которых в Мировом океане сильна зависимость от батиметрии, в Японском море имеют существенный разброс значений на одних и тех же глубинах и сильнее зависят от сезона. На основе рассчитанных параметров также построены карты возможных в Японском море типов локализованных внутренних волн и предельных амплитуд различных семейств солитонов.

Отметим, что используемая модель способна адекватно описывать поведение внутренних волн в прибрежных водах при условии плавного (по сравнению с масштабами рассматриваемых длинноволновых процессов) изменения свойств среды как в пространстве, так и во времени. Однако в шельфовой зоне

Японского моря до глубин ~ 40 м в летне-осенний период возможны изменения структуры термостратификации несколько раз в день под влиянием внешних по отношению к внутренним волнам факторов (напр., сейшевых колебаний, прохождения вихревых структур и т. п.) – от практически однородной до развитой линейной стратификации. Поэтому для успешного применения модели, основанной на уравнении Гарднера, в таких условиях и областях требуется более подробная гидрология: модель может достаточно точно качественно и количественно воспроизводить внутренние волновые поля, если осуществить пересчет параметров по текущей стратификации, что неоднократно было проделано для различных районов Мирового океана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Garwood J. C., Musgrave R. C., Lucas A. J.* Life in Internal Waves // *Oceanography*. 2020. Vol. 33, iss. 3. P. 38–49. doi:10.5670/oceanog.2020.313
2. Internal Solitary Wave Activities near the Indonesian Submarine Wreck Site Inferred from Satellite Images / T. Wang [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, iss. 2. 197. doi:10.3390/jmse10020197
3. *Li J., Zhang Q., Chen T.* Numerical Investigation of Internal Solitary Wave Forces on Submarines in Continuously Stratified Fluids // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, iss. 12. 1374. doi:10.3390/jmse9121374
4. Experimental study of forces on a multi-column floating platform in internal solitary waves / M. Chen [et al.] // *Applied Ocean Research*. 2018. Vol. 78. P. 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.06.014>
5. Effects on acoustics caused by ocean solitons, Part B: Acoustics / S. A. Chin-Bing [et al.] // *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*. 2009. Vol. 71, iss. 12. P. e2194–2204. doi:10.1016/j.na.2009.04.069
6. Internal tide and nonlinear internal wave behavior at the continental slope in the northern south China Sea / T. F. Duda [et al.] // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2004. Vol. 29, iss. 4. P. 1105–1130. doi:10.1109/JOE.2004.836998
7. *Shroyer E. L., Moum J. N., Nash J. D.* Mode 2 waves on the continental shelf: Ephemeral components of the nonlinear internal wavefield // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2010. Vol. 115, iss. C7. C07001. doi:10.1029/2009JC005605
8. Internal Wave Breathers in the Slightly Stratified Fluid / T. Talipova [et al.] // *Microgravity Science and Technology*. 2020. Vol. 32. P. 69–77. doi:10.1007/s12217-019-09738-2
9. Интенсивные волновые боры на осеннем пикноклине шельфовых вод залива Петра Великого Японского моря / Г. И. Долгих [и др.] // *Доклады Академии наук*. 2018. Т. 479, № 2. С. 200–205. doi:10.7868/S0869565218080194
10. Episodes of nonlinear internal waves in the northern East China Sea / J. H. Lee [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2006. Vol. 33, iss. 18. L18601. doi:10.1029/2006GL027136
11. Mapping the internal wave field in the Baltic Sea in the context of sediment transport in shallow water / O. Kurkina [et al.] // *Journal of Coastal Research*. 2011. Special iss. 64. P. 2042–2047.
12. Propagation regimes and populations of internal waves in the Mediterranean Sea basin / O. Kurkina [et al.] // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2017. Vol. 185. P. 44–54. doi:10.1016/j.ecss.2016.12.003
13. Kinematic parameters of internal waves of the second mode in the South China Sea / O. Kurkina [et al.] // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2017. Vol. 24, iss. 4. P. 645–660. doi:10.5194/npg-24-645-2017
14. The impact of seasonal changes in stratification on the dynamics of internal waves in the Sea of Okhotsk / O. Kurkina [et al.] // *Estonian Journal of Earth Sciences*. 2017. Vol. 66, iss. 4. P. 238–255. doi:10.3176/earth.2017.20

15. *Филатов Н. Н.* Состояние и перспективы исследований гидрофизических процессов и экосистем внутренних водоемов (обзор) // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 1. С. 3–14. doi:10.7868/S2073667319010015
16. *Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Сабинин К. Д.* Исследование особенностей генерации и распространения внутренних волн в бесприливных морях по данным спутниковой радиолокации // *Доклады Академии наук*. 2011. Т. 436, № 3. С. 407–411. EDN NDJRTD.
17. Simulation of the Transformation of Internal Solitary Waves on Oceanic Shelves / R. Grimshaw [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2004. Vol. 34, iss. 12. P. 2774–2791. doi:10.1175/JPO2652.1
18. Internal solitary waves control offshore extension of mud depocenters on the NW Iberian shelf / W. Zhang [et al.] // *Marine Geology*. 2019. Vol. 409. P. 15–30. <https://doi.org/10.1016/j.mar-geo.2018.12.008>

Об авторах:

Кокоулина Мария Владимировна, ассистент кафедры «Прикладная математика», ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева» (603155, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24); старший инженер лаборатории нелинейной гидрофизики и природных катастроф, ФГБУН «Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева» Дальневосточного отделения Российской академии наук (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), **ORCID ID: 0000-0001-5890-3649**, **ResearcherID: AAD-7131-2019**, **Scopus Author ID: 57212345658**, **SPIN-код: 3788-0620** **AuthorID: 990977**, koulinamaria97@gmail.com

Куркина Оксана Евгеньевна, ведущий научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория «Моделирование природных и техногенных катастроф», ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева» (603155, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), кандидат физико-математических наук, доцент, **ORCID ID: 0000-0002-4030-2906**, **ResearcherID: G-9577-2011**, **Scopus Author ID: 36676379700**, **SPIN-код: 9098-6373** **AuthorID: 40952**, Oksana.Kurkina@mail.ru

Талипова Татьяна Георгиевна, ведущий научный сотрудник, ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева» (603155, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24); ведущий научный сотрудник лаборатории нелинейной гидрофизики и природных катастроф, ФГБУН «Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева» Дальневосточного отделения Российской академии наук (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43). доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1967-4174**, **ResearcherID: A-1580-2014**, **Scopus Author ID: 7004244713**, **SPIN-код: 4837-6302** **AuthorID: 40951**, tgtalipova@mail.ru

Куркин Андрей Александрович, проректор по научной работе, заведующий кафедрой «Прикладная математика», ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева» (603155, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24); ведущий научный сотрудник лаборатории нелинейной гидрофизики и природных катастроф, ФГБУН «Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева» Дальневосточного отделения Российской академии наук (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), доктор физико-математических наук, профессор, профессор РАН, **ORCID ID: 0000-0003-3828-6406**, **ResearcherID: A-1972-2014**, **Scopus Author ID: 7003446660**, **SPIN-код: 1390-3940** **AuthorID: 35546**, aakurkin@gmail.com

Пелиновский Ефим Наумович, главный научный сотрудник, ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева» (603155, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24); главный научный сотрудник лаборатории нелинейной гидрофизики и природных катастроф, ФГБУН «Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева» Дальневосточного отделения Российской академии наук (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), доктор физико-математических наук, профессор, **ORCID ID: 0000-0002-5092-0302**, **ResearcherID: I-3670-2013**, **Scopus Author ID: 7004951110**, **SPIN-код: 8949-9088** **AuthorID: 103314**, pelinovsky@gmail.com