

ОСОБЕННОСТИ ПЛОТНОСТНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ ВОД ЯПОНСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО АТЛАСА WOA18 В КОНТЕКСТЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛИННЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН

Кокоулина М.В.^{1,2}, Куркина О.Е.¹, Куркин А.А.^{1,2}

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

²Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, г. Владивосток,
aakurkin@gmail.com

Среднеклиматические сезонные особенности плотностной стратификации вод Японского моря для летнего и зимнего сезонов на основании данных открытого международного гидрологического атласа WOA18 проанализированы на основании карт интегрального индекса стратификации [1–3], представляющего собой потенциальную энергию необходимую для полного перемешивания столба морской воды единичного объема:

$$I = -\frac{1}{H} \int_{-H}^0 (\rho - \langle \rho \rangle) g z dz, \quad \langle \rho \rangle = \frac{1}{H} \int_{-H}^0 \rho dz, \quad (1)$$

где z – вертикальная координата, $\rho(z)$ – плотность морской воды, $\langle \rho \rangle$ – среднее значение плотности по глубине, g – ускорение силы тяжести, H – толщина столба воды (полная глубина моря в анализируемой точке). I обращается в ноль, когда столб воды полностью перемешан по вертикали, и увеличивается по мере увеличения расслоенности столба воды. Зоны с более ярко выраженными вертикальными перепадами плотности морской воды характеризуются большими значениями индекса стратификации и представляют собой благоприятную среду для более интенсивных бароклинных процессов с высокой плотностью потоков бароклиной энергии, что может быть использовано при планировании гидротехнических работ и хозяйственной деятельности.

На рис. 1 приведены карты индекса стратификации в Японском море для летнего и зимнего сезона по гидрологическим данным атласа WOA18, а на рис. 2 – гистограммы распределения значений I . Видно, что всюду в Японском море значения индекса стратификации весьма чувствительны к сезону, зимой значения существенно уменьшаются. Зависимость от батиметрии выражена умеренно.

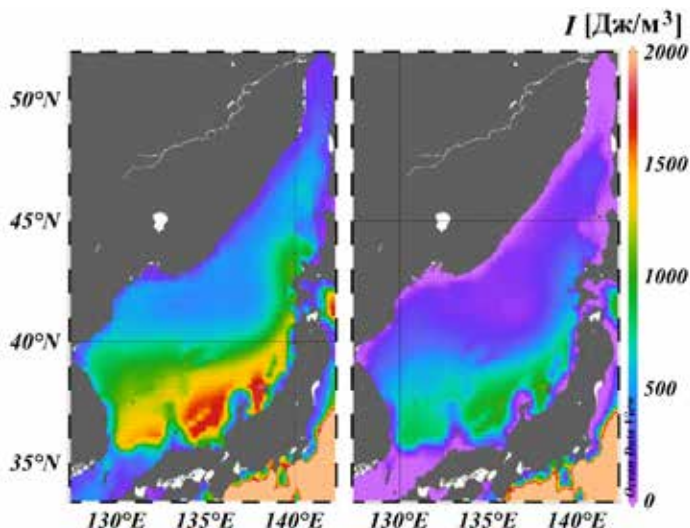
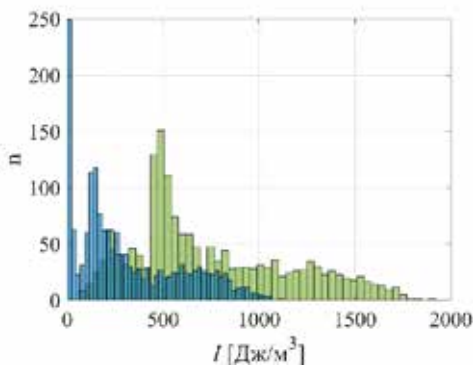


Рис. 1. Карты индекса стратификации I для Японского моря по данным WOA18, Слева для лета, справа для зимы.

Рис. 2. Гистограммы распределений значений индекса стратификации I в Японском море по данным WOA18, зеленый цвет – лето, синий – зима.



Как оказалось, индекс стратификации I в выбранной форме находится в тесной функциональной связи с кинематическими параметрами длинных линейных внутренних волн и может быть использован для их экспресс-оценок. Чтобы продемонстрировать это, были взяты массивы фазовой скорости длинных линейных внутренних волн для Японского моря, рассчитанные на основе данных WOA18 [4]. Зависимость фазовой скорости от индекса стратификации в Охотском море с аппроксимацией функцией

$$c = a(I/I_0)^{1/2}, \quad (2)$$

где $I_0 = 100 \text{ Дж/м}^3$, $a = 0.3561 \pm 0.0007 \text{ м/с}$ для лета и $a = 0.3742 \pm 0.0017 \text{ м/с}$ с 99%-м доверительным интервалом показана на рис. 3. Полученная аппроксимирующая функция очень точно описывает исходные точки (коэффициент достоверности $R^2 > 0.99$ как для летнего сезона, так и для зимнего) и может быть использована для упрощенных, быстрых оценок значений фазовой скорости длинных внутренних волн без численного решения дифференциальных уравнений [5].

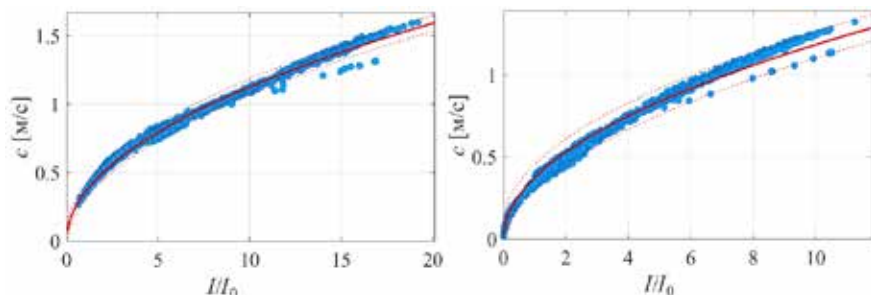


Рис. 3. Зависимость фазовой скорости c длинных линейных внутренних волн от нормированного индекса стратификации I/I_0 (слева для лета, справа для зимы). Красная сплошная линия – аппроксимация функцией (2), красным пунктиром показаны границы 99% доверительного интервала.

Интересно отметить, что построенная параметризация скорости для длинных линейных внутренних волн по форме аналогична известной зависимости $c = \sqrt{gH}$ для длинных поверхностных волн, где H – изменяющаяся по пространству глубина бассейна, только в качестве характеристики среды распространения для внутренних волн выступает индекс стратификации плотности морской воды I (1), который несет в себе информацию, как о глубине моря, так и о вертикальном распределении плотности в точке. В дальнейшем интересно будет исследовать, как меняется коэффициент a в формуле (2) в различных акваториях Мирового океана и насколько он зависит от используемого источника гидрологических данных. Пока аналогичные расчеты были проведены для Охотского моря [6] по данным того же атласа, там наблюдалась такая же ситуация высокой нелинейной корреляции значений c и I с тем же законом (2), причем значения a для Охотского моря ($a = 0.3371 \text{ м/с}$ для лета и $a = 0.35 \text{ м/с}$ для зимы) близки к значениям для Японского моря, указанным выше.

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.

Литература

1. Ladd C., Stabeno P.J. Stratification on the Eastern Bering Sea shelf revisited. *Deep Sea Research Part II // Topical Studies in Oceanography*. 2012. V. 65. P. 72-83.
2. Ueno H., Komatsu M., Ji Z., Dobashi R., Muramatsu M., Abe H., Hirawake T. Stratification in the northern Bering Sea in early summer of 2017 and 2018. *Deep Sea Research Part II // Topical Studies in Oceanography*. 2020. V. 181. Art. No. 104820.
3. Hamada T., Kim S. Stratification potential-energy anomaly index standardized by external tide level. *Estuarine // Coastal and Shelf Science*. 2021. V. 250. Art. No. 107138.
4. Кокоулина М.В., Куркина О.Е., Талипова Т.Г., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Особенности средnekлиматических характеристик внутренних волн в Японском море на основе атласа WOA18 // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. № 5.
5. Булатов В.В., Владимиров Ю.В. О расчете собственных функций и дисперсионных кривых основной вертикальной спектральной задачи уравнения внутренних гравитационных волн // *Математическое моделирование*. 2007. Т. 19. №. 2. С. 59-67.
6. Кокоулина М.В., Куркина О.Е., Куркин А.А., Епифанова А.С., Епифанов С.А. Особенности гидрологических условий в Охотском море, влияющих на характеристики внутренних волн // *Экологические системы и приборы*. 2023. № 7. С. 3-17.