

Краткое сообщение

УДК 551.583.1

DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-668-675

EDN: CСYQIX



**ПРОЯВЛЕНИЕ ЭФФЕКТА КАББЕЛИНГА-АНТИКАББЕЛИНГА
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ГАЛОКЛИНА В ЭСТУАРИЯХ
НА ПРИМЕРЕ Р. РАЗДОЛЬНОЙ
(АМУРСКИЙ ЗАЛИВ, ЯПОНСКОЕ МОРЕ)**

Т.Р. Кильматов^{1,2}, Н.И. Рудых^{1*}

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43;

² Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского,
690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а

Аннотация. Рассмотрен частный случай проявления нелинейности уравнения состояния морской воды при смешении вод разной солёности в приложении к формированию галоклина в эстуариях. В зависимости от солёности плотность образующейся смеси может быть выше (при низких значениях солёности) либо ниже (при высокой солёности) среднеарифметической плотности двух компонент, что в устойчиво стратифицированной по солёности жидкости обуславливает эффект уплотнения при смешении (каббелинга) для вышележащих вод низкой солёности и эффект разуплотнения при смешении (антикаббелинга) для нижележащих вод высокой солёности. Представлены расчёты значения солёности в точке смены каббелинга антикаббелингом, которая зависит от средней температуры смешиваемых вод. На примере зимних и летних натурных наблюдений в эстуарии р. Раздольной, впадающей в зал. Петра Великого Японского моря, показано, что солёность в галоклине соответствует точке смены знака эффекта, меняясь в зависимости от температуры. В летний период, когда температура воды в эстуарии порядка 22 °С, максимальный градиент солёности в галоклине наблюдается на изогалине 10 епс, а в зимний сезон, когда температура снижается до 1 °С, максимальный градиент смещается на изогалину 18 епс. Расположение максимального градиента соответствует значениям солёности вблизи точки смены каббелинга антикаббелингом, причем выше этого уровня происходит процесс уплотнения при смешении, который способствует опусканию вод, а ниже — процесс разуплотнения, способствующий подъёму вод. Встречное конвергентное движение является дополнительным механизмом самоподдержания галоклина в обостренном состоянии.

Ключевые слова: эстуарий, галоклин, уравнение состояния морской воды, каббелинг, уплотнение-разуплотнение при смешении воды с разной солёностью

Для цитирования: Кильматов Т.Р., Рудых Н.И. Проявление эффекта каббелинга-антикаббелинга при формировании галоклина в эстуариях на примере р. Раздольной (Амурский залив, Японское море) // Изв. ТИНРО. — 2023. — Т. 203, вып. 3. — С. 668–675. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-668-675. EDN: CСYQIX.

* Кильматов Талгат Рустемович, доктор физико-математических наук, профессор, talgat_k@mail.ru, ORCID 0000-0002-0574-1452; Рудых Наталья Ивановна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, rudykh@poi.dvo.ru, ORCID 0000-0001-6714-7662.

© Кильматов Т.Р., Рудых Н.И., 2023

Short message

Action of cabbeling-anticabbeling effect in formation of the halocline in estuaries on example of the Razdolnaya River (Peter the Great Bay, Japan Sea)

Talgat R. Kilmатов*, Natalia I. Rudykh**

* Pacific Oceanological Institute, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Str., Vladivostok, 690041, Russia; Maritime State University, 50, Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003, Russia

** Pacific Oceanological Institute, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Str., Vladivostok, 690041, Russia

* D.Phys.-Math., professor, talgat_k@mail.ru, ORCID 0000-0002-0574-1452

** Ph.D., senior researcher, rudykh@poi.dvo.ru, ORCID 0000-0001-6714-7662

Abstract. Nonlinearity effect of the seawater density equation for mixing of waters with different salinity is considered for a case of the halocline formation in estuaries. Depending on salinity, density of the mixture can be higher (at low salinity) or lower (at high salinity) than the arithmetic mean density of the two components, so an effect of compaction during mixing (cabbeling) is observed in the upper part of halocline with lower salinity, whereas an effect of decompaction during mixing (anticabbeling) occurs in its lower part with higher salinity. The salinity value at the point of cabbeling change to anticabbeling is calculated that depends on average temperature of the mixed waters. In the real halocline (estuary of the Razdolnaya/Suifen River flowing into Peter the Great Bay, Japan Sea), the highest vertical gradient of salinity is observed along the isohaline, which value changes depending on temperature. In summer, when the water temperature in the estuary is about 22 °C, the maximum gradient is observed at the isohaline 10 psu, while in winter, when the temperature drops to 1 °C, the maximum gradient shifts to the isohaline 18 psu. These isohaline values correspond to the salinity values for the point of cabbeling change to anticabbeling. The cabbeling effect above this level promotes sinking of water, but the anticabbeling effect below this level promotes rising of water. This encountering convergent motion is an additional mechanism of the halocline self-sustaining in sharp state.

Keywords: estuary, halocline, seawater equation of state, cabbeling, salt water mixing

For citation: Kilmатов T.R., Rudykh N.I. Action of cabbeling-anticabbeling effect in formation of the halocline in estuaries on example of the Razdolnaya River (Peter the Great Bay, Japan Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 203, no. 3, pp. 668–675. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-668-675. EDN: CCYQIX.

Введение

Современные возможности измерительной и вычислительной техники позволяют все более точно исследовать физические процессы в море, детально моделировать гидрометеорологические процессы с учетом даже тонких нюансов. Такая особенность физического процесса смешения воды с разной температурой и соленостью, обусловленная нелинейностью уравнения состояния морской воды, как уплотнение при смешении (каббеллинг), известная уже более века [Witte, 1902], обычно учитывается при рассмотрении крупномасштабных процессов в океане, например фронтогенеза, формирования водных масс и т.п. [Foster, 1972; Кильматов, Кузьмин, 1991; Klocker, McDougall, 2010; Groeskamp et al., 2016; Кильматов, 2022]. В мезомасштабе, характерном для шельфовых, прибрежных и эстуарных районов, где все процессы обострены, эффектом каббеллинга, имеющим второй порядок малости, пренебрегают. Вместе с тем этот эффект в эстуариях рек также обостряется, кроме того, имеет особенности, поэтому по возможности следует рассматривать и его.

В эстуариях эффект уплотнения-разуплотнения при смешении пресной речной и соленой морской воды с примерно равной температурой отличается тем, что если при низкой солености плотность смеси получается выше средней арифметической плотности двух компонент (аналогично эффекту каббеллинга в океане), а при высокой солености плотность смеси меньше средней арифметической, происходит разуплотнение при смешении. Поскольку процессы уплотнения и разуплотнения разнонаправлены, во втором случае можно говорить об эффекте антикаббеллинга.

Теоретические результаты апробированы на примере процесса смешения вод р. Раздольной с водами Амурского залива Японского моря. Отметим, что исследования физических и химических процессов в эстуарии р. Раздольной активизировались в последние годы [Важова, Зуенко, 2015; Тищенко и др., 2017; Семкин и др., 2019], поскольку имеют и прикладное значение, так как эти процессы определяют термодинамические, биологические, экологические и даже демографические параметры акватории, прилегающей к крупному порту и центру Дальневосточного региона России — г. Владивосток.

Цель работы — показать, что вертикальная структура вод в эстуариях, характеризующаяся острым галоклином, отделяющим верхний слой опресненной воды от придонного слоя соленой воды, помимо прочих причин формирования, имеет механизм самоподдержания, обусловленный эффектами каббелинга-антикаббелинга, возникающими вследствие нелинейности уравнения состояния морской воды. При этом в условиях примерно равной температуры речных и морских вод в слабо соленой смеси в верхней части галоклина происходит уплотнение (каббелинг), а в более соленой смеси в нижней части галоклина — разуплотнение (антикаббелинг).

Теория развития каббелинга-антикаббелинга в эстуарии

Рассмотрим частный случай уравнения состояния морской воды, когда определяющую роль в изменении плотности играет соленость. В реальности эта ситуация возникает на ярко выраженном галоклине в эстуариях рек при смешении пресной и морской воды с близкой температурой. В этом случае уравнение состояния можно рассматривать как функцию одного аргумента — солености (при фиксированных других параметрах).

Проведем анализ изменения плотности морской воды в процессе смешения по каноническому уравнению состояния в соответствии с TEOS-10 [<http://www.TEOS-10.org/>] при атмосферном давлении. Расчеты выполнены с помощью онлайн калькуляторов плотности*, плотность представлена в килограммах на кубический метр ($\text{кг}/\text{м}^3$), соленость — в единицах практической солености (eps), потенциальная температура — в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$).

Пресный поверхностный и соленый придонный слои в эстуариях разделяются переходным слоем быстрого изменения характеристик (слоем скачка, галоклином), имеющим определенную толщину, т.е. пресная и соленая воды смешиваются не сразу всеми своими объемами, а постепенно, микрослоями. Допустим, в этих микрослоях происходит смешение в равных объемах вод с одинаковой температурой и с соленостями, отличающимися в обе стороны от солености образующейся смеси на равную величину ΔS , т.е. $S_1 = S + \Delta S$, $S_2 = S - \Delta S$. Результатом их смешения будет вода с соленостью S и температурой T . Вследствие нелинейности уравнения состояния плотность смеси $\rho(T, S)$ не равна средней арифметической компонент $\bar{\rho} = \frac{1}{2} [\rho(T, S + \Delta S) + \rho(T, S - \Delta S)]$, и эту разность можно представить в следующем виде:

$$\delta\rho = \rho(T, S) - \frac{1}{2} [\rho(T, S + \Delta S) + \rho(T, S - \Delta S)] \approx -\frac{1}{8} \frac{\partial^2 \rho}{\partial S^2} \Delta S^2. \quad (1)$$

Последнее приближенное равенство получено из разложения функции (1) в ряд Тейлора [Кильматов, Кузьмин, 1991]. Из него следует, что знак $\delta\rho$ в данном приближении зависит только от кривизны функции зависимости плотности от солености. Следуя терминологии Witte [1902], если в результате смешения $\delta\rho > 0$, то такой эффект называется каббелингом. В случае разуплотнения при смешении, т.е. если $\delta\rho < 0$, такой эффект называется антикаббелингом. В условиях океана, когда смешиваются воды с

* Calculator/salt-water-density. <https://www.translatorscafe.com/unit-converter/ru-RU/calculator/salt-water-density/>. 2023.; Schlitzer R. Ocean Data View. Software. URL <https://odv.awi.de>, 2023.

разной температурой и соленостью, эффект антикаббеллинга наблюдается редко. Но разуплотнение возможно при смешении вод разной солености в условиях, когда вкладом градиента температуры в изменение плотности можно пренебречь, что довольно обычно для эстуариев. По формуле (1), используя калькуляторы плотности, несложно оценить количественно величину $\delta\rho$ при разной температуре и солености смеси. На рис. 1 продемонстрирован эффект каббеллинга-антикаббеллинга в зависимости от солености смеси, образующейся при смешении вод, условно различающихся по солености на 4 епс, для двух случаев, типичных для летнего и зимнего сезонов — с температурой обеих водных масс 22 и 1 °С (значения температуры взяты из данных натурных наблюдений, подробно рассматриваемых ниже).

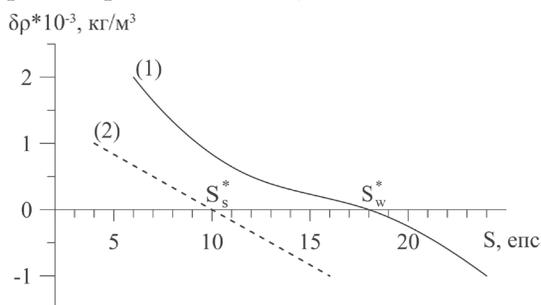


Рис. 1. Рассчитанные по формуле (1) величины уплотнения-разуплотнения при смешении вод с соленостью на 2 епс выше и ниже солености смеси ($\Delta S = 2$ епс) в зависимости от солености смеси для случаев смешения вод с температурой 1 °С (1) и 22 °С (2). Соленость, при которой эффект каббеллинга сменяется эффектом антикаббеллинга, отмечена символами S_w^* и S_s^* (зимний и летний сезоны)

Fig. 1. Values of compaction-decompaction calculated by Equation 1 for mixing of the waters with salinity in 2 psu above and below their mixture salinity ($\Delta S = 2$ psu) as a function of the mixture salinity for cases of mixing the waters with temperature of 1 °C (1) and 22 °C (2). The salinity at which the cabbeling effect is replaced by the anticabbeling effect is marked by S_w^* and S_s^* for winter and summer, respectively

При уровне солености S_w^* , S_s^* , отмеченном на рис. 1 для обоих случаев, эффект уплотнения-разуплотнения отсутствует, т.е. $\rho = \rho(S)$ и $\delta\rho(T, S^*) = 0$. Изменения этого уровня в зависимости от температуры смешиваемых вод $S^* = S(T)$ представлены на рис. 2. Можно видеть, что рост температуры смеси сопровождается понижением уровня солености, при котором меняется знак эффекта. Так, для случаев, показанных на рис. 1, при низкой температуре (1 °С) смена знака эффекта происходит при низкой солености ($S_s^* \sim 10$ psu), а при высокой температуре (22 °С) — при высокой солености ($S_w^* \sim 18$ psu).

Важное следствие этой особенности процесса смешения вод по вертикали в окрестности точки смены знака эффекта уплотнения-разуплотнения — возникновение дополнительной силы плавучести в поле гравитационных сил. Выше изогалины S^* при низкой солености смеси происходит уплотнение при смешении (каббеллинг), ниже этой изогалины при высокой солености смеси — разуплотнение (антикаббеллинг). Вследствие этого в верхней части галоклина плавучесть понижена, что способствует заглублению вод, а в нижней части галоклина возникает дополнительная плавучесть, способствующая подъему вод. Возникает процесс конвергенции, который является внутренним механизмом обострения вертикального градиента в галоклине. Когда максимальный градиент в галоклине совпадает с уровнем солености S^* , т.е. находится в «ядре» конвергенции, этот механизм обеспечивает самоподдержание резкого градиента солености именно на этом уровне. Отсюда следует, что если соленость на уровне максимального градиента в реальном эстуарном галоклине соответствует величине S^* , меняющейся в зависимости от температуры, то это является проявлением эффекта каббеллинга-антикаббеллинга, связанного с нелинейностью уравнения состояния морской воды.

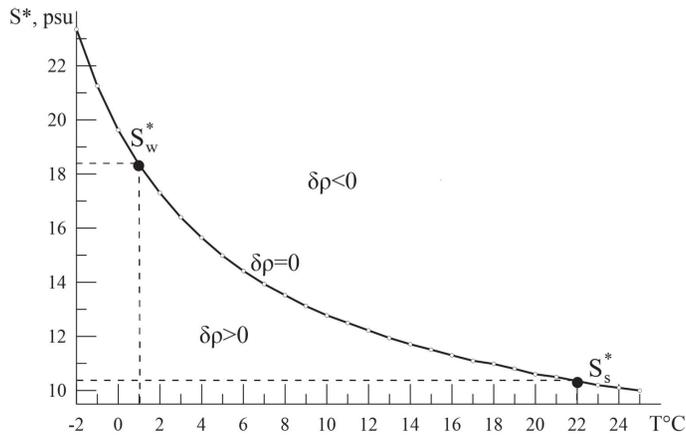


Рис. 2. Соленость, при которой каббелинг сменяется антикаббелингом (S^*) в зависимости от температуры (T). Величины S_w^* и S_s^* соответствуют уровням отсутствия эффекта уплотнения-разуплотнения для двух случаев, показанных на рис. 1

Fig. 2. Salinity at which cabbeling is replaced by anti-cabbeling (S^*), as a function of temperature (T). The values of S_w^* and S_s^* correspond to the level of both effects absence for two cases shown at Fig. 1

Апробация теоретических предпосылок на примере эстуария р. Раздольной

Рассмотрим положение максимального градиента в галоклине при разных температурах по данным наблюдений в эстуарии р. Раздольной в зимний и летний сезоны (рис. 3). Летом гидрологические наблюдения выполнены с борта НИС «Малахит», зимой — со льда. Строго говоря, температура смешиваемых вод разной солености в оба сезона не была одинаковой. Однако, оценивая раздельный вклад градиента солености и температуры в вертикальную стратификацию, получаем, что вклад солености в условиях эстуария р. Раздольной преобладает:

$$\frac{\beta \Delta S}{-\alpha \Delta T + \beta \Delta S} \cdot 100\% \sim 90\%, \quad (2)$$

где α , β — коэффициенты термического расширения и соленостного сжатия морской воды; ΔT , ΔS — перепад температуры и солености от дна до поверхности по данным наблюдений. Это позволяет применить приближение в формуле (1), предложенное для случая формирования стратификации вертикальным градиентом солености. Следуя теоретической зависимости уровня солености S^* , обеспечивающего наилучшим образом самоподдержание градиента солености, от температуры, в холодный сезон максимальный градиент должен наблюдаться при более высокой солености. На реальных профилях солености уровни S_w^* и S_s^* , определенные теоретически для случаев температуры смеси 1 и 22 °C (взятых в качестве примера из данных наблюдений за температурой в эстуарии р. Раздольной), в оба сезона находятся посередине галоклина, в области максимальных градиентов, что подтверждает предположение о самоподдержании градиента солености механизмом уплотнения-разуплотнения при смешении, по крайней мере, отчасти.

При формировании плотностной структуры эстуария представленный в работе физический процесс уплотнения-разуплотнения при смешении обеспечивает изменения плотности на величины второго порядка малости. Безусловно, главную роль в формировании макростратификации вод в эстуариях играют другие факторы, прежде всего приток пресной воды, а также ветровое и приливное перемешивание, прогрев, эстуарная циркуляция. Однако для тонкой структуры галоклина рассмотренный эффект, по-видимому, является важным внутренним механизмом самоорганизации и самоподдержания в обостренном состоянии.

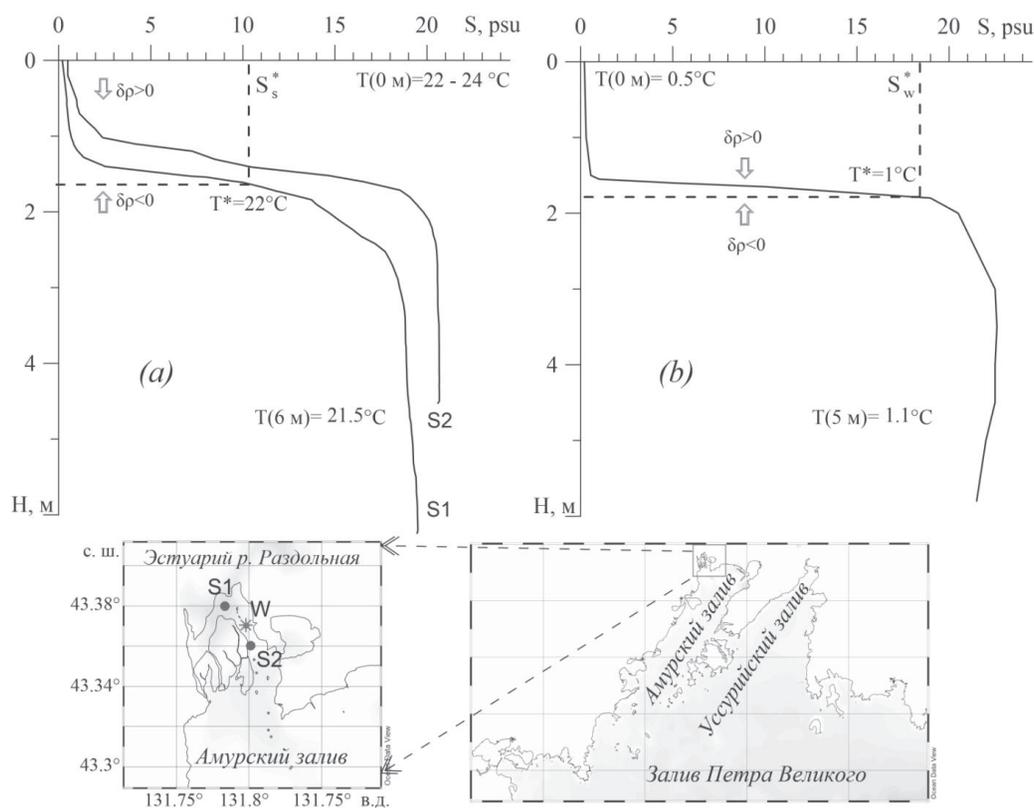


Рис. 3. Вертикальные профили солёности в эстуарии р. Раздольной в летний (а — 19.08.2007 г., точки *S1* и *S2*, по наблюдениям НИС «Малахит») и в зимний сезоны (б — 23.01.2014 г., точка *W*, по данным П.Ю. Семкина с соавторами [2019])

Fig. 3. Vertical profiles of salinity in the Razdolnaya/Suifen River estuary in summer (а — August 19, 2007, points *S1* and *S2*, the data of RV Malakhit survey) and winter (б — January 23, 2014, point *W*, the data from [Semkin et al., 2019])

Заключение

Выполненное исследование частного случая уравнения состояния морской воды при неизменных температуре и давлении привело к выводу, что в диапазоне солёности, характерной для эстуариев, должны наблюдаться эффекты уплотнения и разуплотнения при смешении вод разной солёности, связанные с нелинейностью этого уравнения. При низкой солёности смеси происходит ее уплотнение, а при высокой солёности — разуплотнение. Отсюда следует, что при вертикальном перемешивании в эстуарии устойчиво стратифицированных по солёности вод (вверху — пресная речная, внизу — солёная морская) возникает особый эффект: в верхней части галоклина смесь уплотняется (эффект каббеллинга), а в нижней его части — разуплотняется (эффект антикаббеллинга). Вследствие этого развивается конвергенция, которая служит внутренним механизмом обострения вертикального градиента в галоклине.

Этот теоретический вывод апробирован на данных наблюдений в эстуарии р. Раздольной, которые показали, что галоклин действительно формируется на уровне солёности, при которой происходит смена знака эффекта уплотнения-разуплотнения.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы выражают благодарность экипажу НИС «Малахит» УНИФ ДВО РАН и научному составу (начальник экспедиции А.Ф. Сергеев) за возможность использовать данные наблюдений.

The authors are grateful to the crew and research staff of RV Malakhit (Far-Eastern branch of Russian Ac. Sci.) and personally to A.F. Sergeev for opportunity to use the oceanographic data collected in the 2014 cruise.

Финансирование работы (FUNDING)

ТОИ ДВО РАН. Государственное задание «Исследование и мониторинг климатически активных веществ, явлений и процессов в дальневосточных морях и их прибрежных зонах», регистрационный номер 122110700009-1.

The study was funded from the budget of Pacific Oceanological Institute, Far-Eastern branch of Russian Ac. Sci., according to the state assignment «Research and monitoring of climatically active substances, phenomena and processes in the Far Eastern Seas and their coastal zones», registration number 122110700009-1.

Список литературы

Важова А.С., Зуенко Ю.И. Особенности распределения биогенных элементов вдоль градиента солености в эстуариях рек Суходол и Раздольная (залив Петра Великого, Японское море) // Изв. ТИНРО. — 2015. — Т. 180. — С. 226–235. DOI: 10.26428/1606-9919-2015-180-226-235.

Кильматов Т.Р. Процесс уплотнения при смешении морских вод Берингова пролива и Чукотского моря в сезонном и климатическом масштабах // Изв. ТИНРО. — 2022. — Т. 202, вып. 2. — С. 409–413. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-409-413. EDN: BYSKLT.

Кильматов Т.Р., Кузьмин В.А. Эффект уплотнения при смешении морских вод и его сезонное проявление на тихоокеанском субарктическом фронте // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. — 1991. — Т. 27, № 8. — С. 883–887.

Семкин П.Ю., Тищенко П.Я., Лобанов В.Б. и др. Обмен вод в эстуарии реки Раздольной (Амурский залив, Японское море) в период ледостава // Изв. ТИНРО. — 2019. — Т. 196. — С. 123–137. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-196-123-137.

Тищенко П.Я., Семкин П.Ю., Тищенко П.П. и др. Гипоксия придонных вод эстуария реки Раздольная // ДАН. — 2017. — Т. 476, № 5. — С. 576–580. DOI: 10.7868/S0869565217290217.

Foster T.D. An Analysis of the Cabbeling Instability in Sea Water // J. Phys. Oceanogr. — 1972. — Vol. 2, Iss. 3. — P. 294–301. DOI: 10.1175/1520-0485(1972)002<0294:AAOTCI>2.0.CO;2.

Groeskamp S., Abernathy R.P., Klocker A. Water mass transformation by cabbeling and thermobaricity // Geophys. Res. Lett. — 2016. — Vol. 43, Iss. 20. — P. 10,835–10,845. DOI: 10.1002/2016GL070860.

Klocker A., McDougall T.J. Influence of the Nonlinear Equation of State on Global Estimates of Dianeutral Advection and Diffusion // J. of Physical Oceanography. — 2010. — Vol. 40, Iss. 8. — P. 1690–1709. DOI: 10.1175/2010JPO4303.1.

Witte E. Zur Theorie den Stromkabelungen // Gaea: Natur und Leben. — Cologne, 1902. — P. 484–487.

References

Vazhova, A.S. and Zuenko, Yu.I., Patterns of nutrients distribution along salinity gradient in the estuaries of the rivers Sukhodol and Razdolnaya/Suifen (Peter the Great Bay, Japan Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2015, vol. 180, pp. 226–235. doi 10.26428/1606-9919-2015-180-226-235

Kilmatov, T.R., Cabbeling due to mixing of the Bering Strait and the Chukchi Sea waters on seasonal and climatic scale, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2022, vol. 202, no. 2, pp. 409–413. doi 10.26428/1606-9919-2022-202-409-413. EDN: BYSKLT.

Kilmatov, T.R. and Kuzmin, V.A., Compaction effect during mixing of sea waters and its seasonal manifestation on the Pacific subarctic front, *Izv. Akad. Nauk SSSR, Fizika atmosfery i okeana*, 1991, vol. 27, no. 8, pp. 883–887.

Semkin, P.Yu., Tishchenko, P.Y., Lobanov, V.B., Barabanshchikov, Yu.A., Mikhailik, T.A., Sagalaev, S.G., and Tishchenko, P.P., Water exchange in the estuary of the Razdolnaya River (Amur Bay, Japan Sea) in the ice covered period, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2019, vol. 196, pp. 123–137. doi 10.26428/1606-9919-2019-196-123-137

Tishchenko, P.Ya., Semkin, P.Ju., Tishchenko, P.P., Zvalinsky, V.I., Barabanshchikov, Yu.A., Mikhailik, T.A., Sagalaev, S.G., Shvetsova, M.G., Shkirnikova, E.M., and Shulkin, V.M.,

Hypoxia of bottom waters of the Razdolnaya River Estuary, *Dokl. Earth Sci.*, 2017, vol. 476, no. 2, pp. 1207–1211. doi 10.1134/S1028334X17100208

Foster, T.D., An Analysis of the Cabbelling Instability in Sea Water, *J. Phys. Oceanogr.*, 1972, vol. 2, no. 3, pp. 294–301. doi 10.1175/1520-0485(1972)002<0294:AAOTCI>2.0.CO;2

Groeskamp, S., Abernathy, R.P., and Klocker, A., Water mass transformation by cabbelling and thermobaricity, *Geophys. Res. Lett.*, 2016, vol. 43, no. 20, pp. 10,835–10,845. doi 10.1002/2016GL070860

Klocker, A. and McDougall, T.J., Influence of the Nonlinear Equation of State on Global Estimates of Dianeutral Advection and Diffusion, *J. Phys. Oceanogr.*, 2010, vol. 40, no. 8, pp. 1690–1709. doi 10.1175/2010JPO4303.1

Witte, E., Zur Theorie den Stromkabbellungen, *Gaea: Natur und Leben*, Cologne, 1902, pp. 484–487.

Calculator/salt-water-density. <https://www.translatorscafe.com/unit-converter/ru-RU/calculator/salt-water-density/>. Cited January 20, 2023.

Schlitzer, R., *Ocean Data View. Software*. URL <https://odv.awi.de>, 2023.

The international thermodynamic equation of Seawater-2010: Calculation and use of thermodynamic properties, Intergovernmental oceanographic Commission, Manuals and Guides, no. 56, UNESCO. <http://www.TEOS-10.org/>. Cited January 20, 2023.

Поступила в редакцию 4.08.2023 г.

После доработки 1.09.2023 г.

Принята к публикации 4.09.2023 г.

The article was submitted 4.08.2023; approved after reviewing 1.09.2023; accepted for publication 4.09.2023