

# ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ СМЕШЕНИИ ВОД РАЗНОЙ СОЛЕННОСТИ В ПРИЛОЖЕНИИ К АКВАТОРИИ ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ

**Т.Р. Кильматов, Н.И. Рудых**

Обсуждается влияние эффекта уплотнения–разуплотнения морской воды на формирование поля солёности применительно к Арктическому бассейну. Представлены численные примеры расчета эффекта уплотнения и разуплотнения при изотермическом смешении вод разной солёности как следствие нелинейности уравнения состояния морской воды. Если перемешиваются распресненные и соленые воды, то плотность смеси выше осредненной плотности исходных компонент, то есть наблюдается эффект уплотнения при смешении. При перемешивании менее соленой и более соленой морской воды возникает процесс разуплотнения. В этом случае плотность смеси будет ниже средней плотности исходных компонент. Представлены примеры расчета эффекта уплотнения–разуплотнения для смешения вод в равной пропорции с различными средними температурами. Рассматривается приложение процесса к формированию вертикальной галинной структуры в акватории Арктического бассейна, в которую поступают значительные объемы пресной воды из сибирских рек. Натурные наблюдения демонстрируют резкий галоклин, разделяющий поверхностные опресненные и нижележащие соленые воды. Представлены профили солёности в Обской губе, Карском море, море Лаптевых, Восточно-Сибирском море. Данные наблюдений показывают, что граница раздела процесса уплотнения–разуплотнения совпадает с положением галоклина. Выше ядра галоклина при смешении слабосоленых вод реализуется процесс уплотнения при смешении и тенденция к опусканию вод; глубже ядра галоклина – эффект разуплотнения и подъем вод. Возникающая вертикальная конвергенция является дополнительным механизмом поддержания границы поверхностных опресненных и нижележащих соленых вод в обостренном состоянии.

**Ключевые слова:** мониторинг водной среды, опресненная поверхностная вода Арктики, галоклин, уравнение состояния морской воды, уплотнение, разуплотнение.

## Введение

Мониторинг океанологических параметров, в частности в акваториях смешения пресных и морских вод, является важной составляющей глобального прогнозирования в условиях современных климатических сдвигов. К значимым в этом отношении акваториям относятся эстуарии сибирских рек. Улучшение прогнозирования одновременно предполагает более детальное изучение физических эффектов и включение их в современные прогностические модели.

Эффекты, обусловленные нелинейностью уравнения состояния воды, являются величинами вто-

рого порядка малости по отношению к градиентам температуры и солёности, но влияют на климатическую систему в целом. К ним относятся, в частности, эффект максимума плотности в пресноводных водоемах при 4°C, эффекты перемешивания вод в разных частях Мирового океана [1–6]. Наиболее ярким их проявлением является процесс каббелинга, когда при смешении вод с разными температурными и солёностными характеристиками образуется более плотная вода. Этот процесс в океанологии впервые описан в [7], хронология вопроса изложена в [8–9]. Каббелинг наблюдается в полярных акваториях Мирового океана при формировании глубинных вод [7], на океанических фронтах [10], в частности, в Тихом

океане на субарктическом фронте [2] и в Беринговом проливе при смешении тихоокеанских и арктических вод [11].

Целью настоящей работы является исследование частного случая проявления эффекта нелинейности уравнения состояния морской воды, когда главный вклад в вариацию плотности вносит изменение солёности. Данные ограничения имеют прикладное значение для акваторий морей восточной Арктики, куда поступает значительное количество пресных вод от речных стоков, осадков и вследствие процессов ледотаяния [12–14]. Здесь вертикальная стратификация главным образом определяется солёностью, которая изменяется в эстуариях впадающих рек от нуля на поверхности до 35 psu у дна. Данные наблюдений отмечают плюмы опресненной воды в поверхностном слое, разделенные с нижележащим солёным резким галоклином.

### ■ Количественная оценка уплотнения–разуплотнения при смешении морских вод разной солёности

Рассмотрим проявление нелинейности при смешении морских вод на основе классического уравнения состояния морской воды [15]. Ниже рассматриваются процессы при постоянном давлении. Нелинейный эффект уравнения состояния  $\rho = \rho(T, S)$  при смешении вод разных  $TS$ -характеристик в общем случае проявляется в том, что плотность смешанной воды не равна средневзвешенной плотности исходных вод. Аналитически это наиболее просто записывается при смешении равных объемов исходных компонент. Обозначим температуры и солёности смешиваемых вод соответственно  $T_1, T_2, S_1, S_2$ . В данном приближении смешанная вода будет иметь среднеарифметические значения температуры и солёности, то есть  $\bar{T} = 0,5(T_1 + T_2)$ ,  $\bar{S} = 0,5(S_1 + S_2)$ . Тогда при смешении равных объемов компонент эффект уплотнения–разуплотнения оценивается по следующей формуле:

$$\delta\rho = \rho(\bar{T}, \bar{S}) - \frac{1}{2}[\rho(T_1, S_1) + \rho(T_2, S_2)] \approx -\frac{1}{8}d \rho(\bar{T}, \bar{S}) \quad (1)$$

Последнее приближенное равенство получено разложением функции в ряд до квадратичных членов [2], то есть эффект уплотнения с точностью до второго порядка малости пропорционален второму дифференциалу плотности с обратным знаком. Ниже, при  $\delta\rho > 0$  ( $\delta\rho < 0$ ), будем говорить об уплотнении (разуплотнении) при смешении.

Рассмотрим частный случай формулы (1), когда температуры смешиваемых вод одинаковы и равны  $T$ . То есть в приближении полуэмпирического уравнения состояния процесс является изотермическим, и солёность смешиваемых компонент различна.

Введем обозначения  $S_1 = S + \Delta S, S_2 = S - \Delta S$ ,  $\bar{\rho} = \frac{1}{2}[\rho(T, S + \Delta S) + \rho(T, S - \Delta S)]$ , тогда формула (1) приобретает удобный для дальнейшей интерпретации вид:

$$\delta\rho = \rho(T, \bar{S}) - \bar{\rho} \approx -\frac{1}{8}\partial_{SS}^2 \rho(T, \bar{S}) \Delta S^2 \quad (2)$$

Из уравнения (2) видно, что в этом частном случае уплотнение при смешении наблюдается, когда вторая производная плотности по солёности отрицательна; и, наоборот, разуплотнение имеет место при  $\partial_{SS}^2 \rho(T, \bar{S}) > 0$ . Используем формулу (2) для оценки уплотнения–разуплотнения при смешении вод разной солёности и постоянной температуре ниже  $15^\circ\text{C}$ .

С учетом изложенного приближения ясно, что на  $TS$ -плоскости процесс перемешивания проходит по прямой, параллельной оси солёности. Геометрически на  $TS$ -плоскости нелинейность проявляется в том, что изолинии плотности пересекают эту прямую с разным шагом. Также понятно, что физически уплотнение соответствует случаю, когда объем смешанной воды меньше суммы исходных объемов, и наоборот: при разуплотнении объем смеси превышает сумму объемов смешиваемых компонент.

Ограничение по температуре связано с конкретным приложением данной работы к водам арктических акваторий, принципиальных ограничений для расчета по значениям температуры нет. Представленные ниже расчеты плотности проводились программой *ODV* [16], в соответствии с *TEOS-10* [15], а также для сравнения – калькулятором [17]. Отметим, что результаты расчетов проверялись по двум калькуляторам, поскольку эффект имеет второй порядок малости и дублирование позволяет избежать ложных выводов при приближенной оценке близких к нулю величин. В расчетах ниже везде используется потенциальная температура. Плотность представлена в  $\text{кг}/\text{м}^3$ , солёность в *psu*, потенциальная температура в градусах  $^\circ\text{C}$ . Отметим, что параллельные расчеты по разным калькуляторам расходятся незначительно, оба подтверждают представленные ниже основные выводы работы.

Рассмотрим результаты расчетов величины  $\delta\rho$  при изотермическом перемешивании вод разной солёности при следующих сценариях. При фиксированной температуре рассчитывалось  $\delta\rho$  по формуле (2) при разных солёностях  $S$  в диапазоне от нуля

**Таблица 1. Количественная демонстрация эффекта смены знака уплотнения – разуплотнения при смешении вод разной солености ( $\Delta S = 2 \text{ psu}$ ) при постоянной температуре  $T = 6^\circ\text{C}$ . Жирный шрифт обозначает эффект разуплотнения. (Плотность в  $\text{кг}/\text{м}^3$ )**

<i>Spsu</i>	4	10	16	22	28	34
$\rho$	1003.119	1007.850	1012.574	1017.298	1022.028	1026,765
$\bar{\rho}$	1003.116	1007.949	1012.574	1017.298	1022.029	1026,766
$\delta\rho \cdot 10^3$	2.5	0.5	<b>-0.1</b>	<b>-0.3</b>	<b>-0.4</b>	<b>-0.4</b>

до  $36 \text{ psu}$ , перепад солености компонент фиксированный и  $\Delta S = 2 \text{ psu}$ . В качестве примера в табл. 1 представлены результаты расчета смешиваемых вод разной солености при постоянной температуре  $6^\circ\text{C}$ .

В табл. 1 показано, что при низкой солености в опресненных водах наблюдается эффект уплотнения вод при смешении. При смешении соленых вод, превышающих  $15 \text{ psu}$ , происходит процесс разуплотнения. Обозначим через  $S^*$  соленость, при которой происходит смена знака  $\delta\rho$ . Это точка перегиба функции  $\rho = \rho(S)$ . В свою очередь,  $S^*$  зависит от температуры воды.

В табл. 2 демонстрируются результаты расчета  $\delta\rho$  при различных температурах и соленостях смешиваемых вод при фиксированном  $\Delta S = 2 \text{ psu}$ . Последний столбец табл. 2 показывает, что  $S^* = S^*(T)$  является убывающей функцией температуры и диапазон проявления эффекта разуплотнения увеличивается в холодных водах. При более низкой температуре воды эффект разуплотнения наблюдается вплоть до солености порядка  $20 \text{ psu}$ . Второй столбец демонстрирует, что при низкой солености наблюдается эффект уплотнения, а третий столбец – что при высокой солености происходит разуплотнение вод. Количественно эти эффекты разнонаправлены при изменении температуры: при росте температуры уплотнение при смешении опресненных вод уменьшается, а разуплотнение соленых вод увеличивается.

**Таблица 2. Количественные оценки уплотнения при смешении опресненных и соленых вод при различных значениях температуры и солености**

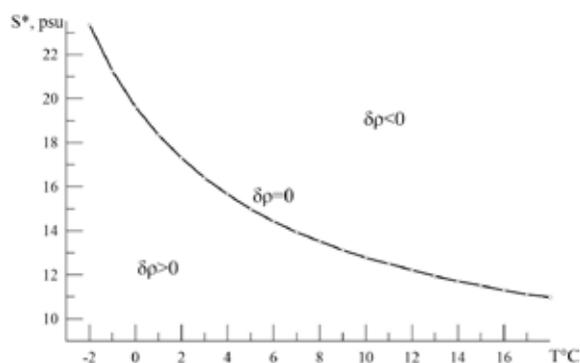
Температура морской воды	Уплотнение при солености $2 \text{ psu}$	Разуплотнение при солености $34 \text{ psu}$	Соленость, при которой
$T^\circ\text{C}$	$\delta\rho(T, 2) \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$	$\delta\rho(T, 34) \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$	$S^* \text{ psu}, \delta\rho = 0$
-1	5.5	-0.16	<b>21</b>
0	5.3	-0.20	<b>19</b>
2	4.9	-0.28	<b>17</b>
4	4.7	-0.34	<b>15</b>
6	4.5	-0.39	<b>14</b>
8	4.3	-0.43	<b>13</b>
10	4.2	-0.47	<b>13</b>

Отметим, что хотя представленные численные оценки табл. 2 представлены при смешении вод с заданным перепадом солености с конкретным шагом  $\Delta S = 2 \text{ psu}$ , значение солености  $S^*$ , характеризующее смену знака уплотнения в точке перегиба, не зависит от перепада солености,

$$\rho(T, S^*) - \bar{\rho}(T, S^*) = 0,$$

$$\text{откуда следует } \partial_{SS}^2 \rho(T, S^*) = 0. \quad (3)$$

Формально кривая  $S^* = S^*(T)$  разделяет TS-плоскость на две области (рис. 1). Ниже кривой наблюдается уплотнение, выше кривой – разуплотнение в процессе смешения вод разной солености.



**Рис. 1.** Функция  $S^* = S^*(T)$  – граница перехода процесса уплотнения на процесс разуплотнения при смешении вод разной солености в зависимости от температуры смешиваемых вод

Таким образом, представленные оценки нелинейности уравнения состояния морской воды показывают, что с увеличением средней солености компонент смешения эффект уплотнения при прочих остальных равных условиях меняет знак и переходит в процесс разуплотнения. Значение солености  $S^*$ , при которой происходит смена знака  $\delta\rho$ , уменьшается при росте температуры.

В качестве комментария о втором порядке малости рассматриваемого эффекта отметим, что в рассматриваемом процессе уплотнения–разуплотнения в морской воде он по своему вкладу совпадает с известным проявлением максимума плотности в пресных водоемах при температуре  $4^\circ\text{C}$ . В частности, при смешении пресных вод  $3^\circ\text{C}$  и  $5^\circ\text{C}$  в равных объемах плотность смешанной воды будет выше плотности исходных вод на  $\delta\rho = 7 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3$ . Таким образом, эта малая величина обуславливает глобальный эффект невозможности

промерзания пресноводных водоемов до дна.

Рассмотрим обсуждаемый эффект для реальных морских акваторий, опираясь прежде всего на базы океанографических данных ТОИ ДВО РАН [18].

### ■ База океанографических данных ТОИ ДВО РАН и технические средства ее формирования

Тихоокеанский океанологический институт (ТОИ ДВО РАН) провел более 500 комплексных экспедиций по сбору гидрологических, гидрофизических и гидрохимических данных по акваториям Мирового океана (База данных глубоководных наблюдений экспедиций ТОИ ДВО РАН, БД «Океан-2»: Свидетельство о рег. № 2008620058 / Авторы Е.В. Дмитриева, И.Д. Ростов – № 2007620400, заявл. 27.11.2007, зарег. 23.01.2008) [19]. По результатам наблюдений сформирована многопрофильная система усвоения, хранения, анализа океанографических данных. Основными инструментами накопления и преобразования океанографической информации, полученной в рейсах НИС, являются СУБД Paradox с разработанной в ТОИ двухуровневой логической моделью интегрированной базы данных [18], а также платформа OceanDataView [16]. Структурированная по рейсам исходная и сопутствующая информация хранится отдельно на разных носителях. В настоящее время База глубоководных океанографических данных (БОД) ТОИ ДВО РАН ежегодно пополняется по окончании рейса или с некоторой задержкой, необходимой для первичной обработки данных. В целом разработанные технологии и базы данных обеспечивают возможность более эффективного использования имеющихся информационных ресурсов о состоянии морской среды, их интеграции и управления потоками данных [18]. Данная БОД [19] не является изолированной. Тихоокеанский океанологический институт участвовал в международном проекте сохранения океанографических данных [20] и, таким образом, указанные базы имеют пересечение.

Основной объем гидрологических наблюдений, хранящихся в БОД ТОИ ДВО РАН, выполнен Тихоокеанским океанологическим институтом путем использования термосолевондов (СТД) различных моделей от производителей Северной Америки и Северной Европы [21]. БОД также пополняется обработанными и проконтролированными данными СТД-наблюдений сторонних организаций. Используются специальные программы и алгоритмы для контроля и корректировки данных наблюдений [21]. К настоящему времени накоплено 22586 глубоководных океа-

нографических станции с зондовым разрешением по вертикали от 1 м до 1 см.

Ниже в работе использованы натурные данные, полученные с помощью океанографического оборудования, соответствующего международным стандартам. В северных экспедициях НИС «Академик М.А. Лаврентьев» применялась измерительная система, представляющая собой гидрологический зонд STD SBE 9, оснащенный датчиками температуры, проводимости, давления до глубины 640 м, с возможностью подключения дополнительно датчиков, например, кислорода, мутности и других. Параллельно проводились наблюдения гидрологическим зондом высокого разрешения STD SBE 911 plus с двумя измерительными ячейками температуры, проводимости, давления до 6000 м. Этот прибор также имеет дополнительные датчики кислорода, мутности, флуоресценции, альтиметрии. Для настоящей работы были привлечены данные НИС «Академик Шулейкин», Карское море, 1987 г. и НИС «Иван Петров», Обская губа, 1995 г. Всего непосредственно в районе Обской губы в проекте WOD2018 имеется более 2700 океанографических станций за период 1904–2012 гг.

### ■ Восточная Арктика как природный полигон процесса вертикального перемешивания распресненных и морских вод с резко выраженным галоклином

Обсуждаемый эффект нелинейности уравнения состояния морской воды приложим к формированию вертикальной термогалинной структуры применительно к акваториям эстуариев и морей восточной Арктики. В основном значительное количество пресных вод поступает в Карское море, море Лаптевых, Восточно-Сибирское море от речных стоков сибирских рек [12–14], [22–23]. Данные наблюдений демонстрируют наличие двухслойной вертикальной структуры. Это поверхностный слой опресненной воды менее 20 psu и нижележащие воды, где соленость более чем на 10 psu выше. Разделяющий их галоклин располагается до глубины 12 м, рис. 2.

На рис. 2 на профилях солености выделена граница ( $S^*$ ,  $T$ ), разделяющая процесс перехода от уплотнения к разуплотнению. Видно, что эта граница расположена на галоклине. Стрелки схематически показывают тенденцию к конвергенции в окрестности галоклина, что является механизмом самоподдержания границы раздела в обостренном состоянии. На рис. 2 также представлены значения температуры на поверхности и в галоклине, чтобы оценить раздельно термический и галинный вклады в вертикальную

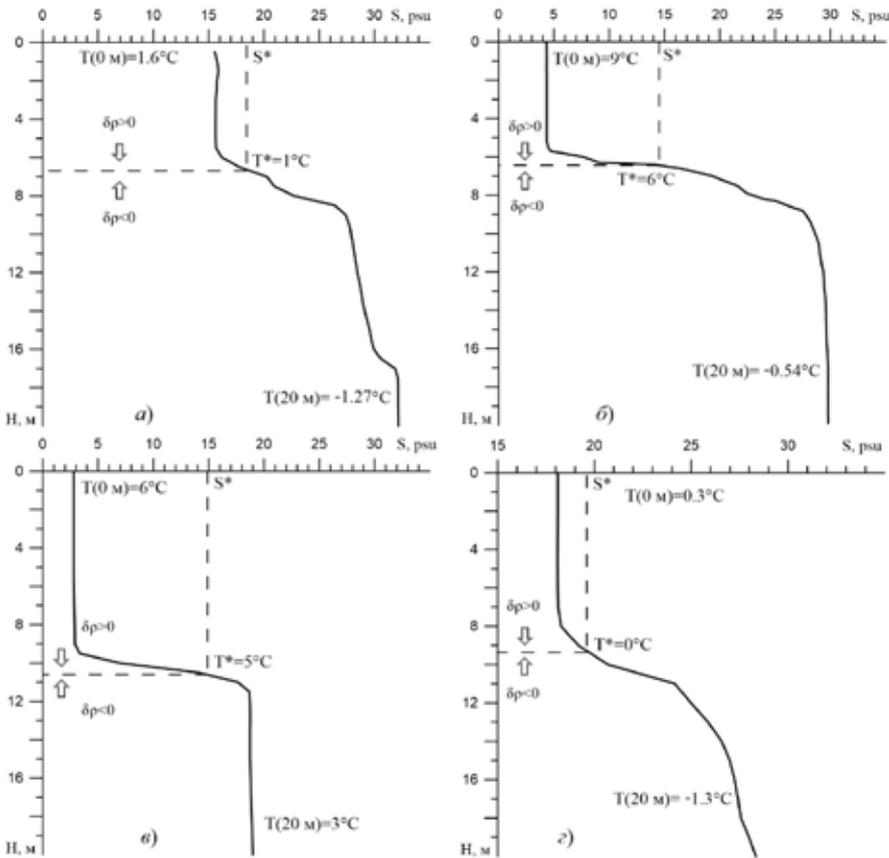


Рис. 2. Вертикальные профили солёности в акватории восточной Арктики. Галоклин и граница уплотнения–разуплотнения при смешении ( $S^*$ ,  $T$ ), на одной глубине. а – БОД ТОИ ДВО РАН, ТБ-0012, Карское море, 76.4 в.д., 73.8 с.ш., 30 сентября 2006 г.; б – WOD2018, НИС «Иван Петров», Обская губа, 74 в.д., 72.7 с.ш., 27 августа 1995 г.; в – БОД ТОИ ДВО РАН, НИС «Академик М. А. Лаврентьев», Море Лаптевых, 130.4 в.д., 71.7 с.ш., 24 сентября 2016 г.; г – БОД ТОИ ДВО РАН, НИС «Академик М. А. Лаврентьев», Восточно-Сибирское море, 154 в.д., 72.8 с.ш., 10 октября 2018 г. (БОД ТОИ ДВО РАН – База океанографических данных ТОИ)

стратификацию. Покомпонентное влияние оценивается по следующей приближенной формуле в терминах частоты Брента–Вяйсяля:

$$N^2 = \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \approx -\alpha g \frac{\Delta T}{\Delta h} + \beta g \frac{\Delta S}{\Delta h} = N_T^2 + N_S^2 \quad (4)$$

Здесь  $g$  – ускорение свободного падения;  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты термического расширения и солевого сжатия морской воды;  $N_T^2$ ,  $N_S^2$  обозначены соответствующие компоненты вклада градиента температуры и солёности в устойчивость вертикальной стратификации. Данные, в том числе из базы океанографических данных ТОИ ДВО РАН, базы WOD, [19] показывают, что в осенне-зимний и весенний сезоны  $N_S^2$  вносит практически 100%-й вклад в вертикальный перепад плотности. Летом вертикальная разность температур в верхнем слое увеличивается, но доля  $N_T^2$  в общей стратификации не превышает 10%. Отсюда следует обоснованность применения формулы (2) в приложении к интерпретации данных наблюдений.

Безусловно, наличие опресненного слоя, его геофизические параметры, географическое распределение, положение галоклина определяются прежде всего объемами поступающей пресной воды и гидрометеорологическими факторами. Но при про-

чих равных условиях рассмотренный выше эффект уплотнения–разуплотнения при смешении вод разной солёности является слабым, но все-таки дополнительным механизмом самоподдержания галоклина в обостренном состоянии вследствие уплотнения вод выше галоклина и разуплотнения под ним. Хотя количественно рассматриваемый эффект имеет второй порядок малости, при современном прогрессе в области моделирования он может быть учтен как дополнительный механизм формирования вертикальной структуры вод в океане.

## Заключение

Резюмируем результаты работы в приложении к формированию вертикальной галинной структуры:

1. Выделяется нелинейное свойство уравнения состояния морской воды при смешении вод разной солёности (при постоянных температуре и давлении). При низкой солёности функция  $\rho = \rho(S)$  выпукла вверх, то есть  $\partial_{SS}^2 \rho(S) < 0$ ; при высокой солёности функция выпукла вниз  $\partial_{SS}^2 \rho(S) > 0$ . Точка перегиба при  $S=S^*$ , в которой  $\partial_{SS}^2 \rho(S) = 0$ , в свою очередь, является убывающей функцией температуры, то есть  $\frac{\partial S^*}{\partial T} < 0$ .

2. Применительно к вертикальному перемешиванию опресненных и нижележащих соленых вод при условии, что на границе смешения  $S=S^*$  возникают разнонаправленные процессы плавучести, выше границы раздела добавляется отрицательная плавучесть, ниже границы положительная, что приводит к эффекту вертикальной конвергенции.

3. Данные наблюдений вертикальной термогалинной структуры в акваториях Карского моря, моря Лаптевых, Восточно-Сибирского моря демонстрируют наличие острого галоклина, сформированного, безусловно, вертикальной стратификацией. Одновременно присутствующий эффект уплотнения–разуплотнения является дополнительным механизмом самоподдержания галоклина в обостренном состоянии.

Работа выполнена по теме государственного задания «Исследование и мониторинг климатически активных веществ, явлений и процессов в дальневосточных морях и их прибрежных зонах», регистрационный номер 122110700009-1

### Справка об авторах

**КИЛЬМАТОВ Талгат Рустемович**, доктор физико-математических наук, профессор

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева  
Дальневосточного отделения РАН

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Дальневосточный федеральный университет

Адрес: 690620 Приморский край, г. Владивосток, о. Русский,  
п. Аякс, 10

Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

Адрес: 690003, г. Владивосток, Верхнепортовая 50а

E-mail: talgat\_k@mail.ru

ORCID: 0000-0002-0574-1452

**РУДЫХ Наталья Ивановна**, кандидат географических наук,  
старший научный сотрудник

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева  
Дальневосточного отделения РАН

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

E-mail: rudykh@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0001-6714-7662



### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Fofonoff N.P. Thermal Stability of World Ocean Thermoclines // *Journal of Physical Oceanography*. 2001. No. 31(8). P. 2169–2177.
2. 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. № 27(8). С. 883–887.
3. Козлов В.Ф., Кузьмин В.А. К вопросу о природе главных фронтальных зон в океане // *Океанология*. 1984. № 24(4). С. 574–577.
4. Klocker A., McDougall T.J. Influence of the Nonlinear Equation of State on Global Estimates of Dianeutral Advection and Diffusion // *Journal of Physical Oceanography*. 2010. No. 40. P. 1690–1709. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/62598>
5. Кильматов Т.Р., Рудых Н.И. Проявление эффекта каббеллинга антикаббеллинга при формировании галоклина в эстуариях на примере р. Раздольной (Амурский залив, Японское море) // *Изв. ТИНРО*. 2023. № 203(3). С. 668–675. <https://izvestiya.tinro-center.ru/jour/article/view/865>
6. Groeskamp S., Abernathy R.P., Klocker A. Water mass transformation by cabbeling and thermobaricity // *Geophysical Research Letters*. 2016. Vol. 10, No. 43(20). P. 835–10,845. <https://www.researchgate.net/publication/308684513>
7. Witte E. Zur Theorie den Stromkabelungen. Gaea: Natur und Leben, Cologne, 1902. P. 484–487.
8. Зубов Н.Н. Уплотнение при смешении морских вод разной температуры и солености. М.: Изд-во МГУ, 1957. 49 с.
9. Федоров К.Н. О роли уплотнения при смешении в динамике океанических вод // *Докл. АН СССР*. 1981. № 261(4). С. 985–988.
10. Foster T.D. An Analysis of the Cabbeling Instability in Sea Water // *Journal of Physical Oceanography*. 1972. No. 2. P. 294–301.
11. Кильматов Т.Р. Процесс уплотнения при смешении морских вод Берингова пролива и Чукотского моря в сезонном и климатическом масштабах // *Изв. ТИНРО*. 2022. № 202(2). С. 409–413. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2022-202-409-413>
12. Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В. и др. Поверхностный опресненный слой в Карском море // *Океанология*. 2010. № 50(5). С. 698–701.
13. Carmack E.C., Yamamoto-Kawai M., Haine T.W.N. et al. Freshwater and its role in the Arctic marine system: sources, disposition, storage, export, and physical and biogeochemical consequences in the Arctic and global oceans // *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2016. No. 121. P. 675–717. <https://doi.org/10.1002/2015JG003140>
14. Osadchiv A.A., Pisareva M.N., Spivak E.A. et al. Freshwater transport between the Kara, Laptev, and East-Siberian seas // *Scientific Reports*. 2020. No. 10 (Article number: 13041). URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-70096-w>
15. The international thermodynamic equation of Seawater-2010: Calculation and use of thermodynamic properties. URL: <http://www.TEOS-10.org/>
16. Schlitzer R. Ocean Data View. URL: <https://odv.awi.de/>, 2024.
17. Калькулятор плотности морской воды. URL: <https://www.translatorscafe.com/unit-converter/ru-RU/calculator/salt-water-density/calculator/salt-water-density>
18. Дмитриева Е.А., Ростов И.Д. Разработка и реализация океанографических баз данных по северо-западной части Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2004. 143 с.
19. База Данных ТОИ ДВО РАН. 2024. URL: <https://www.poi.dvo.ru/ru/lab15>.
20. World Ocean Database (WOD 2018). URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-ocean-database>
21. Лазарюк А.Ю. Динамическая коррекция CTD-данных // *Подводные исследования и робототехника*. 2009. № 2(8). С. 59–71.
22. Лапин С.А., Мазо Е.Л., Маккавеев П.Н. Комплексные исследования Обской губы (июль–октябрь 2010 г.) // *Океанология*. 2011. Т. 51, №4. С. 758–762.
23. Лапин С.А. Гидрологическая характеристика Обской губы в летне-осенний период // *Океанология*. 2011. Т. 51, № 6. С. 984–993.

# CHANGE OF THE SEA WATER DENSITY DUE TO MIXING OF DIFFERENT SALINITY SEA WATERS AND APPLICATION TO HALOCLINE FORMATION IN THE EASTERN ARCTIC

**T.R. Kilmатов, N.I. Rudykh**

The influence of the thermodynamic nonlinear properties of seawater on the Arctic basin salinity field formation is discussed. The oceanographic database of POI FEB RAS is used. The non-linear property of the international thermodynamic equation of seawater, when due to mixing the components average density is not equal to the density of the mixture, is considered. The process of mixing the different salinity waters at a constant temperature is shown. If the components are when mixing desalinated and slightly saline waters, then the density of the mixed water is higher than the weighted average density of the initial components. There is a compaction effect during mixing and below this effect will be called cabbelling. The result of the mixing of two different highly saline sea waters is the water and its density is less than the average value of the component densities. We call this process decompaction. The quantitative examples of calculations for water mixing at low temperatures are presented. It is noted that the effect is of the same order as the cabelling of fresh water at 4°C temperature. The application to the formation of the vertical haline structure of the Arctic Basin waters, which receives significant volumes of fresh water, is shown. The discussed effect is concentrated in the halocline depth. Above the core of the halocline there are weakly saline waters and cabbelling occurs. There is a tendency for the water to sink. Below the halocline are more saline waters mixing. In this depth there is the decompaction effect and waters get some trend to rise. The vertical convergence is an additional mechanism for maintaining a sharp boundary between surface desalinated and underlying saline waters. There is confirmation for salinity profiles in the Gulf of Ob, the Kara Sea, the Laptev Sea and the East Siberian Sea.

**Keywords:** monitoring of the water area, surface fresh water of the Eastern Arctic, halocline, international thermodynamic equation of sea water, cabbelling, decompaction

## References

1. Fofonoff N.P. Thermal Stability of World Ocean Thermoclines. *Journal of Physical Oceanography*. 2001; 31(8): 2169–2177.
2. Kil'matov T.R., Kuz'min V.A. Effekt uplotneniya pri smeshenii morskikh vod i ego sezonnoe proyavlenie na tihookeanskom subarkticheskom fronte. *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*. 1991; 27(8): 883–887.
3. Kozlov V.F., Kuz'min V.A. K voprosu o prirode glavnykh frontal'nykh zon v okeane. *Okeanologiya*. 1984; 24(4): 574–577.
4. Klocker A., McDougall T.J. Influence of the Nonlinear Equation of State on Global Estimates of Dianeutral Advection and Diffusion. *Journal of Physical Oceanography*. 2010; 40: 1690–1709. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/62598>
5. Kil'matov T.R., Rudykh N.I. Proyavlenie effekta kabbellinga antikabbellinga pri formirovani galoklina v estuariyah na primere r. Razdol'noj (Amurskij zaliv, Yaponskoe more). *Izvestiya TINRO*. 2023; 203(3): 668–675. <https://izvestiya.tinro-center.ru/jour/article/view/865>
6. Groeskamp S., Abernathy R. P., Klocker A. Water mass transformation by cabbelling and thermobaricity. *Geophysical Research Letters*. 2016; 43(20): 10,835–10,845. <https://www.researchgate.net/publication/308684513>
7. Witte E. Zur Theorie den Stromkabbelungen. *Gaea: Natur und Leben*. Cologne. 1902.; 484–487.
8. Zubov N.N. Uplotnenie pri smeshenii morskikh vod raznoy temperatury i solenosti. M.: Izd-vo MGU; 1957. 49 s.
9. Fedorov K.N. O roli uplotneniya pri smeshenii v dinamike okeanicheskikh vod. *Doklady AN SSSR*. 1981; 261(4): 985–988.
10. Foster T.D. An Analysis of the Cabbelling Instability in Sea Water. *Journal of Physical Oceanography*. 1972; 2: 294–301.
11. Kil'matov T.R. Process uplotneniyaprismesheniimorskikhvodBeringovaprolivaiCHukotskogomorya v sezonnom i klimaticheskommasshtabah. *Izvestiya TINRO*. 2022; 202(2): 409–413. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2022-202-409-413>
12. Zacepin A.G., Zav'yalov P.O., Kremeneckij V.V. i dr. Poverhnostnyj opresnennyj sloj v Karskom more. *Okeanologiya*. 2010; 50(5): 698–701.
13. Carmack E.C., Yamamoto-Kawai M., Haine T.W.N. et al. Freshwater and its role in the Arctic marine system: sources, disposition, storage, export, and physical and biogeochemical consequences in the Arctic and global oceans. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2016; 121: 675–717. <https://doi.org/10.1002/2015JG003140>
14. Osadchiev A.A., Pisareva M.N., Spivak E.A. et al. Freshwater transport between the Kara, Laptev, and East-Siberian seas. *Scientific Reports*. 2020; 10(Article number: 13041) <https://www.nature.com/articles/s41598-020-70096-w>

15. <http://www.TEOS-10.org/> The international thermodynamic equation of Seawater-2010: Calculation and use of thermodynamic properties.

16. Schlitzer R. Software. <https://odv.awi.de/software/download/>, 2024.

17. <https://www.translatorscafe.com/unit-converter/ru-RU/calculator/salt-water-density/calculator/salt-water-density>

18. Dmitrieva E.A., Rostov I.D. Razrabotka i realizatsiya okeanograficheskikh baz dannykh po severo-zapadnoy chasti Tikhogo okeana. Vladivostok: Dal'nauka, 2004. 143 s.

19. <https://www.poi.dvo.ru/ru/lab15>. FEBRAS POI Database. 2024.

20. <https://www.nci.noaa.gov/products/world-ocean-database> World Ocean Database (WOD 2018)

21. Lazaryuk A.Yu. Dinamicheskaya korrektsiya STD-dannykh. Podvodnye issledovaniya i robototekhnika. 2009; № 2 (8): 59-71.

22. Lapin S.A., Mazo E.L., Makkaveev P.N. Kompleksnye issledovaniya Obskoj guby (iyul'-oktyabr' 2010 g.). Okeanologiya. 2011; 51(4): 758-762.

23. Lapin S. A. Hidrologicheskaya harakteristika Obskojguby v letne-osennij period. Okeanologiya. 2011; 51(6): 984-993.

## Information about the authors

**KILMATOV Talgat R.**, Dr. in Physics and Mathematical Sciences, Professor

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS

**Address:** 43, Baltyskaya St., Vladivostok, Russia, 6900443

Far Easter Federal University

**Address:** Bld. G, FEFU Campus, Vladivostok, Russia, 690620

Admiral Nevelskoy Maritime State University

**Address:** 50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, Russia, 690059.

**E-mail:** talgat\_k@mail.ru

**ORCID:** 0000-0002-0574-1452

**RUDYKH Natalia I.**, Senior Research Scientist

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS

**Address:** 43, Baltyskaya St., Vladivostok, Russia, 6900443

**E-mail:** rudykh@poi.dvo.ru

**ORCID:** 0000-0001-6714-7662

### Recommended citation:

Kilmatov T.R., Rudykh N.I. CHANGE OF THE SEA WATER DENSITY DUE TO MIXING OF DIFFERENT SALINITY SEA WATERS AND APPLICATION TO HALOCLINE FORMATION IN THE EASTERN ARCTIC // Подводные исследования и робототехника. 2024. No. 2 (48). P. 76–83. DOI: 10.37102/1992-4429\_2024\_48\_02\_09. EDN: VVHDXK.

