

Краткое сообщение

УДК 551.46.062.5

DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-409-413

EDN: BYSKLT



**ПРОЦЕСС УПЛОТНЕНИЯ ПРИ СМЕШЕНИИ ВОД
БЕРИНГОВА ПРОЛИВА И ЧУКОТСКОГО МОРЯ
В СЕЗОННОМ И КЛИМАТИЧЕСКОМ МАСШТАБАХ**

Т.Р. Кильматов*

Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского,
690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а;
Дальневосточный федеральный университет,
690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8

Аннотация. Приведены количественные оценки процесса уплотнения при смешении (cabbeling) поверхностных вод Берингова пролива и Чукотского моря. Летний период характеризуется ярко выраженным процессом каббелинга и приводит к дополнительному увеличению плотности воды на величину порядка $0,059 \text{ кг/м}^3$, что вносит вклад в процесс ускорения опускания теплых соленых вод при продвижении в арктический бассейн. Зимой при близких к нолю температурах воды эффект каббелинга практически исчезает. На основе климатических трендов температуры и солености поверхностных вод проведена оценка изменения процесса уплотнения при смешении в масштабе десятилетий. Оценка показывает возрастающий климатический тренд в летний период порядка $0,002 \text{ (кг/м}^3\text{)/десятилетие}$.

Ключевые слова: каббелинг, уплотнение при смешении вод, Берингов пролив, сезонный ход, климатическая изменчивость

Для цитирования: 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.

Short message

**Cabbeling due to mixing of the Bering Strait and the Chukchi Sea
waters on seasonal and climatic scale**

Talgat R. Kilmatov

Maritime State University, 50, Verkhneportovaya St., Vladivostok, 690003, Russia;
Far-Eastern Federal University, 8, Sukhanov Street, Vladivostok, 690091, Russia
D.Math., professor, talgat_k@mail.ru

Abstract. Cabbeling due to mixing of the surface waters from the Bering Strait and the Chukchi Sea is evaluated quantitatively and variations of its impact on seasonal and climatic scale are analyzed. The cabbeling effect increases additionally the mixed water density in 0.059 kg/m^3

* Кильматов Талгат Рустемович, доктор физико-математических наук, профессор, talgat_k@mail.ru, ORCID 0000-0002-0574-1452.

© Кильматов Т.Р., 2022

in summer and in 0.001 kg/m³ in winter. Seasonal variation of the cabelling repeats the seasonal variation of temperature difference between the interacted water masses ($\Delta T \sim 5,0$ °C in summer, $\Delta T \sim 0,5$ °C in winter). This process provides additional energy for sinking of warm and salt mixed water in summer, when it penetrates far into the Arctic. In winter, the temperature difference between the mixing waters is about zero, so the cabelling almost disappears. Both temperature and salinity have climatic trends in the Chukchi Sea that causes the climate-scale variation of the cabelling: its impact increases in 0.002 kg/m³ per decade in summer because of climatic heating ($\sim 0,13$ °C/decade) and salinity decrease ($\sim 0,04$ psu/decade).

Keywords: cabelling, Bering Strait, seasonal variation, climatic trend

For citation: Kilmатов T.R. Cabelling due to mixing of the Bering Strait and Chukchi Sea waters in 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.

Важность физических процессов в Беринговом проливе как части северного морского пути представляет не только научное, но и практическое значение для навигации. Ниже представлены количественные оценки эффекта уплотнения при смешении (УПС) поверхностных вод (0–10 м) Берингова пролива с более холодными и менее солеными водами Чукотского моря. Физический эффект уплотнения при смешении морских вод разных TS -индексов (T — температура, °C; S — соленость, psu) проявляется в том, что плотность смеси выше средней арифметической плотностей исходных вод [Witte, 1902; Зубов, 1957; Stommel, 1960]. Этот эффект впервые в океанологии был отмечен и обозначен Витте [Witte, 1902] как каббеллинг, история вопроса освещена в литературе [Зубов, 1957; Федоров, 1981]. Процесс уплотнения при смешении наблюдается в Мировом океане на термогалинных фронтах и приводит к дополнительному производству доступной потенциальной энергии в направлении заглубления смешанных вод — даунвеллингу [Кильматов, Кузьмин, 1991; Talley, Yun, 2001]. В частности, в Тихом океане на субарктическом фронте эффект УПС сильно выражен в зимний сезон и интенсивно формирует промежуточные воды пониженной солености [Кильматов, Кузьмин, 1991]. Процесс УПС также происходит на границе более теплых более соленых вод Берингова пролива с холодными слабосолеными водами арктического бассейна.

Цель работы — оценить УПС при смешении поверхностных вод, выходящих из Берингова пролива в Чукотское море. Процесс рассматривается в сезонном и климатическом масштабах.

Количественная оценка процесса УПС в морской воде. Количественный эффект каббеллинга двух типов поверхностных вод соответственно с T_1S_1 (Берингов пролив) и T_2S_2 (Чукотское море) термогалинными характеристиками оценивается по следующей формуле [Кильматов, Кузьмин, 1991]:

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

где уплотнение $\delta\rho$ — превышение плотности смешанной воды над средним арифметическим исходных вод с плотностями $\rho(T_i S_i)$.

Из формулы (1) видно, что УПС аналитически характеризуется вторым дифференциалом уравнения состояния морской воды при атмосферном давлении. Второй дифференциал выражается через вторые частные дифференциалы:

$$d^2\rho(\bar{T}, \bar{S}) = \partial_{TT}^2\rho + 2\partial_{TS}^2\rho + \partial_{SS}^2\rho, \quad (2)$$

где в правой формуле стоят соответствующие вторые частные дифференциалы.

Если ввести масштабы изменения температуры и солености $\Delta T = 1$ °C, $\Delta S = 1$ psu, из уравнения состояния [<http://www.TEOS-10.org/>] получим следующие характерные значения частных дифференциалов:

$$\partial_{TT}^2\rho \sim -10^{-2} \text{ кг/м}^3, \quad \partial_{TS}^2\rho \sim -2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3, \quad \partial_{SS}^2\rho \sim +3 \cdot 10^{-4} \text{ кг/м}^3.$$

Эти величины численно равны вторым производным функции состояния морской воды по соответствующим аргументам. Из оценок представленных характерных

количественных оценок дифференциалов видно, что на термическом фронте происходит уплотнение вод, на соленостном (халинном) фронте будет отрицательное УПС, «разуплотнение». В реальных расчетах эффектом отрицательного УПС можно пренебречь, поскольку он на два порядка меньше положительного. Таким образом, на океанских фронтах величина УПС в большой степени зависит от перепада температур смешиваемых вод.

Исходные данные. Количественный расчет УПС проводился по данным полей температуры и солености в приповерхностном слое (0–10 м) по открытой электронной базе океанологических данных [<https://www.ncei.noaa.gov/products/world-ocean-database>]. Выборка, статистическая обработка данных стандартные. Для оценки сезонного хода процесса отдельно выделяли самый теплый и самый холодный месяц года — соответственно август и февраль. Оценка возможного климатического изменения величины УПС за последние десятилетия проводилась посредством рассчитанных линейных трендов температуры и солености за временной период 1950–2020 гг. Таким образом, в расчетах использовалось 4 временных тренда: по температуре и солености за август месяц и аналогичные тренды за февраль за период 70 лет. Поскольку эти тренды незначительны (не более 0,14 °C/десятилетие по температуре, не более –0,06 psu/десятилетие по солености, табл. 1), использовался временной шаг $\Delta t = 1$ десятилетие. По пространству отдельно выделялись две акватории, которые привязывались к Берингову проливу (65–70° с.ш. 160–170° з.д.) и Чукотскому морю (70–80° с.ш. 160–170° з.д.). Выбор координат акваторий объясняется не только исследованием физики процесса, но и необходимостью достаточного количества данных наблюдений. В общей совокупности для Берингова пролива это 29197 данных, для Чукотского моря — 13749. На зимний период (февраль) данных приходится значительно меньше — для Берингова пролива 393, для Чукотского моря 117, что связано, в том числе, с ледовой обстановкой. Статистическая обработка в итоге сводится к построению временных линейных трендов TS -характеристик с временным шагом десятилетие. Линейные временные тренды изменения температуры воды и солености за последние 70 лет представлены в табл. 1.

Таблица 1

Линейные тренды температуры (T , °C) и солености (S , psu) в верхнем слое Берингова пролива и Чукотского моря за последние десятилетия в летний и зимний сезоны

Table 1

Linear trends of temperature (T , °C) and salinity (S , psu) in the upper layer of the Bering Strait and Chukchi Sea for summer and winter seasons

Месяц	Берингов пролив	Чукотское море
Август	$T = 0,14 \cdot t + 9,08$	$T = -0,01 \cdot t + 3,20$
	$S = -0,06 \cdot t + 30,38$	$S = -0,02 \cdot t + 28,76$
Февраль	$T = 0,12 \cdot t - 1,23$	$T = -0,02 \cdot t - 1,66$
	$S = -0,03 \cdot t + 31,76$	$S = 0,05 \cdot t + 30,30$

В табл. 1 размерность времени t — десятилетие, аргумент $t = 0$ соответствует среднему значению функции (в линейном приближении $t = 0$ соответствует примерно 1985 г.). Линейные тренды табл. 1 показывают тенденции изменения полей — поступающие через пролив в арктический бассейн воды Аляскинского течения имеют тенденцию к нагреванию порядка 1 °C за 100 лет и уменьшению солености порядка 0,5 psu за тот же период. Эффект температурного тренда в акватории Чукотского моря на порядок меньше и находится на уровне ошибки наблюдений и расчетов.

Оценка процесса УПС в сезонном и климатическом масштабах. Расчет плотности морской воды можно провести по представленным в интернете уравнению состояния [<http://www.TEOS-10.org/>] и калькулятору плотности соленой воды [<https://www.translatorscafe.com/unit-converter/ru-RU/calculator/salt-water-density/>]. База данных также за период 1950–2020 гг., лето ежегодно соответствует данным за август месяц,

зима — за февраль. TS — данные для верхнего (0–10 м) слоя воды. Результат: средние климатические плотности поверхностных вод в летний период для Берингова пролива (ρ_b) и Чукотского моря (ρ_c) следующие:

$$\rho_b(9,08\text{ }^{\circ}\text{C}; 30,38\text{ psu}) = 1023,537\text{ кг/м}^3,$$

$$\rho_c(3,20\text{ }^{\circ}\text{C}; 28,76\text{ psu}) = 1022,940\text{ кг/м}^3.$$

Для февраля получаем такие средние характеристики:

$$\rho_b(-1,23\text{ }^{\circ}\text{C}; 31,76\text{ psu}) = 1025,603\text{ кг/м}^3,$$

$$\rho_c(-1,66\text{ }^{\circ}\text{C}; 30,30\text{ psu}) = 1024,442\text{ кг/м}^3.$$

Из сравнения плотностей смешиваемых вод для каждого сезона видно, что вследствие высокой солености в Беринговом проливе воды на горизонтах 0–10 м более тяжелые по отношению к аналогичным водам Чукотского моря в течение всего года. Здесь при последующей оценке внутrigодовой изменчивости УПС важно отметить, что наблюдается сезонный ход разности температур между поверхностными водами Берингова пролива и Чукотского моря более чем в 10 раз: зимой перепад не более 0,5 °C (–1,23...–1,66), летом — более 5,0 °C (9,08–3,20).

По формуле (1) и данным табл. 1 по временному тренду температуры и солености можно оценить значение и временной тренд УПС в рассматриваемой акватории. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Величина УПС и скорость его климатического роста при смешении вод Берингова пролива и Чукотского моря для августа и февраля

Table 2

The cabbeling value for mixing of the surface waters from the Bering Strait and Chukchi Sea ($\delta\rho$, kg/m³) and its climatic trend in August and February ($\delta\rho_t$, kg/m³ per decade)

Месяц	УПС, кг/м ³	Скорость климатического роста УПС, (кг/м ³)/десятилетие
Август	0,059	0,0020
Февраль	0,001	0,0001

Примечание. t — десятилетие.

Наблюдается выраженный сезонный ход УПС — в августе $\delta\rho = 0,059\text{ кг/м}^3$; в феврале $\delta\rho \sim 0,001\text{ кг/м}^3$. Это является следствием сезонного хода перепада температур исходных вод. Из оценки отдельных членов в формуле (2) и табл. 1 следует, что в исследуемой акватории главный вклад в вариацию УПС вносит разность температур смешиваемых вод.

Важно отметить, что на южной границе тихоокеанских субарктических вод на субарктическом фронте, расположенном зонально в районе 40° с.ш., на 150–160° в.д. также наблюдается сезонный ход УПС [Кильматов, Кузьмин, 1991]. Здесь происходит перемешивание с более теплыми и более солеными субтропическими водами продолжения Куроисио. В отличие от Берингова пролива, максимальный перепад поверхностных температур воды на субарктическом фронте отмечается в зимний период, что приводит к сезонному ходу УПС с максимумом зимой. Таким образом, максимальный эффект каббелинга на южной границе субарктических вод происходит зимой, на северной границе — летом.

На основе рассчитанных трендов температуры и солености (см. табл. 1) можно оценить возможные климатические изменения УПС (табл. 2). Хотя представленные величины малы и имеют скорее академический интерес, но в целом данный результат демонстрирует направление тенденций в ближайшие десятилетия. Видно, что климатический тренд УПС в акватории идет в направлении усиления рассматриваемого эффекта. В летний период климатический рост величины УПС порядка 0,002 (кг/м³)/десятилетие, зимой много меньше и за пределами точности.

Резюмируя результаты по количественной оценке каббелинга при смешении поверхностных вод Берингова пролива и Чукотского моря, получим следующее.

Фиксируется резко выраженный сезонный ход величины УПС — в летний период максимальное значение УПС порядка $\delta\rho \sim 0,059\text{ кг/м}^3$ вследствие доминирующего

вклада перепада температур смешиваемых вод порядка $\Delta T \sim 5,0$ °C; в зимний сезон УПС практически исчезает по причине уменьшения перепада температуры на порядков, $\Delta T \sim 0,5$ °C. Перепад солености смешиваемых вод в течение года порядка 1,5 psu.

Наблюдается противоположная направленность сезонного хода УПС субарктических тихоокеанских вод при смешении на северной границе с арктическими водами в Беринговом проливе и на южной границе с субтропическими водами. На северной границе в районе Берингова пролива максимальное значение УПС отмечено летом, в период максимального прогрева. На южной границе на субарктическом фронте в районе 40° с.ш. 150–160° в.д. максимальное значение УПС регистрируется в зимний период. Сезонные вариации УПС совпадают с сезонной изменчивостью перепада температур смешиваемых вод на рассматриваемых границах.

Имеется климатическая тенденция увеличения УПС порядка $\delta\rho_t \sim 0,002$ (кг/м³)/десятилетие в летний период в последующие десятилетия. Это является следствием наблюдаемого климатического изменения термогалинных характеристик поверхностных вод Берингова пролива — нагрев $\Delta T_t \sim 0,13$ °C/десятилетие и уменьшение солености $\Delta S_t \sim 0,04$ psu/десятилетие.

Список литературы

Зубов Н.Н. Уплотнение при смешении морских вод разной температуры и солености. — М. : МГУ, 1957. — 49 с.

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.

Федоров К.Н. О роли уплотнения при смешении в динамике океанических вод // ДАН СССР. — 1981. — Т. 261, № 4. — С. 985–988.

Stommel H. The Gulf Stream: A physical and dynamical description. — Berkeley, Calif. : Univ. of California Press, 1960. — 202 p.

Talley L., Yun J.Y. The role of cabbeling and double diffusion in setting the density of the North Pacific intermediate water salinity minimum // J. Phys. Oceanogr. — 2001. — Vol. 31. — P. 1538–1549.

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

Reference

Zubov, N.N., *Uplotneniye pri smeshenii morskikh vod raznoy temperatury i solenosti* (Sealing at mixing of sea waters of different temperature and salinity), Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1957.

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.

Fedorov, K.N., On the role of compaction during mixing in the dynamics of oceanic waters, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1981, vol. 261, no. 4, pp. 985–988.

Stommel, H., *The Gulf Stream: A physical and dynamical description*, Berkeley, Calif.: Univ. of California Press, 1960.

Talley, L. and Yun, J.Y., The role of cabbeling and double diffusion in setting the density of the North Pacific intermediate water salinity minimum, *J. Phys. Oceanogr.*, 2001, vol. 31, pp. 1538–1549.

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

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, 2022.

World Ocean Database. <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-ocean-database>. Cited January 20, 2022.

Калькулятор плотности солёной воды. <https://www.translatorscafe.com/unit-converter/ru-RU/calculator/salt-water-density/>. Cited January 20, 2022.

Поступила в редакцию 24.02.2022 г.

После доработки 11.04.2022 г.

Принята к публикации 20.05.2022 г.

The article was submitted 24.02.2022; approved after reviewing 11.04.2022; accepted for publication 20.05.2022