

УДК 550.42

ТИХООКЕАНСКИЕ ВОДЫ В ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ МОРЕ: ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$ И $[\text{DIC}]$

© 2024 г. Член-корреспондент РАН Е. О. Дубинина^{1,*}, С. А. Коссова¹, А. А. Осадчиев^{1,2}, Ю. Н. Чижова¹, А. С. Авдеев¹

Поступило 28.12.2023 г.

После доработки 09.01.2024 г.

Принято к публикации 10.01.2024 г.

На основе высокоточных данных об изотопном составе и концентрации растворенного неорганического углерода в водах Берингова моря проведена оценка масштабов и путей распространения его вод в тихоокеанском секторе Северного Ледовитого океана. Несмотря на то что $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$ и $[\text{DIC}]$ не являются классическими консервативными трассерами, в акватории Восточно-Сибирского моря, являющейся зоной активного взаимодействия речного стока с морскими водами, эти параметры показывают присутствие морских вод не только атлантического, но и тихоокеанского происхождения — аналогичных водам Берингова моря. При помощи модели трехкомпонентного смешения получена оценка пространственного распределения тихоокеанских, атлантических и речных вод вдоль двух разрезов Восточно-Сибирского моря. Тихоокеанский компонент распространяется с востока на запад примерно до 160 градуса восточной долготы, а возможно, и западнее, огибая остров Врангеля не только с севера, но и, возможно, с юга. В Восточно-Сибирском море обнаруживаются воды, аналогичные Берингоморским летним поверхностным водам открытого моря, которые выносятся к северному шельфу круговым Берингоморским течением, и верхним промежуточным водам, которые могут попадать в зону северного шельфа моря за счет апвеллинга или активного перемешивания.

Ключевые слова: Арктика, тихоокеанский сектор СЛО, растворенный неорганический углерод, DIC, $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$, Берингово море, Восточно-Сибирское море, речной сток, циркуляция вод

DOI: 10.31857/S2686739724040063

ВВЕДЕНИЕ

Воды Берингова моря имеют особое значение для Северного Ледовитого океана (СЛО): поступая через Берингов пролив, они не только играют опресняющую роль (имея соленость 32–33 е.п.с., Woodgate 2013 и др.), но и привносят в СЛО биогенные элементы, положительно влияющие на первичную продукцию (Aksenov et al., 2015 и др.). Кроме того, из-за водообмена между Беринговым морем и водными массами открытой части Тихого океана, которые содержат повышенные концентрации растворенного неорганического углерода (DIC^1) (Bostok et al., 2010 и др.), берингоморские воды являются дополнительным источником углерода, что имеет большое значение для подкисления вод СЛО.

Тем не менее воды Берингова моря отличаются крайне слабой изученностью, особенно в западной части, где расположены высокопродуктивный Корякский шельф и Командорские острова. Полученные нами (Дубинина и др., 2024) первые данные об изотопных параметрах вод этой акватории показали, что концентрации DIC в Беринговом море действительно являются высокими (2432 ± 32 $\mu\text{моль/кг}$, максимум 2500 $\mu\text{моль/кг}$, Дубинина и др., 2024), даже на фоне открытой части Тихого океана, в глубинных водах которого величины $[\text{DIC}]$ находятся на уровне ≈ 2300 $\mu\text{моль/кг}$ (Ge et al., 2022; Kroopnick 1985). В накоплении $[\text{DIC}]$, по нашим данным, большую роль играют зимние воды Берингова моря, что согласуется с наблюдениями для Чукотского моря в период 2008–2015 гг., в водах которого постоянно возрастала концентрация DIC за счет привноса зимними берингоморскими водами (Chu et al., 2021).

Безусловно, в тихоокеанском секторе СЛО должен наблюдаться четкий “углеродный сигнал”, поступающий со стороны Берингова

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН

²Институт океанологии (ИО) РАН им. П. П. Ширшова

*E-mail: elenadelta@gmail.com

¹ $[\text{DIC}] \approx [\text{CO}_2]_{\text{aq}} + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$

моря, однако с какими именно водными массами и как далеко он распространяется, до сих пор не совсем ясно. Одним из ключевых регионов, где отмечалось присутствие как атлантической, так и тихоокеанской морской воды, является восточная часть континентального склона Восточно-Сибирского моря (Aksenov et al., 2015; Wang et al., 2021 и др.). Наши данные, полученные по материалам 69 рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2017 году в Восточно-Сибирском море, показали, что воды в восточной его части характеризуются повышенными концентрациями DIC с изотопно-облегченным составом углерода по отношению к водам атлантического происхождения. Частично высокие концентрации DIC могут быть отнесены к проявлению модификации вод при замерзании и выносе льда, но, кроме того, нельзя отрицать и влияние тихоокеанских вод, которые могут поступать со стороны Чукотского моря (Дубинина и др., 2020).

Новые данные, полученные нами для западной части Берингова моря (Дубинина и др., 2024) в интервале глубины от 10 до 4291 м, характеризуют разные геохимические обстановки — от мелководных зон высокой биопродуктивности на шельфе до промежуточных и глубинных вод на континентальном склоне. Они дают возможность детально рассмотреть роль тихоокеанских вод в формировании изотопных и концентрационных параметров DIC в тихоокеанском секторе СЛО, что и является главной задачей настоящей работы. Мы провели сопоставление изотопных и концентрационных характеристик DIC в водах Восточно-Сибирского и Берингова морей, учитывая такие особенности, как опреснение вод Восточно-Сибирского моря речным стоком и различие в изотопных и концентрационных параметрах DIC разных водных масс Берингова моря.

МАТЕРИАЛЫ

Изотопные параметры вод Восточно-Сибирского моря изучались в материалах 69 рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” (август 2017 г.). Воды Берингова моря были отобраны в 82 рейсе НИС “Академик Лаврентьев” (июнь-июль 2018 г.). В обоих случаях отбор материалов проведен с помощью батометров Нискина, установленных на пробоотборники SBE32 Carousel. Расположение станций рассматриваемых рейсов показано на рис. 1.

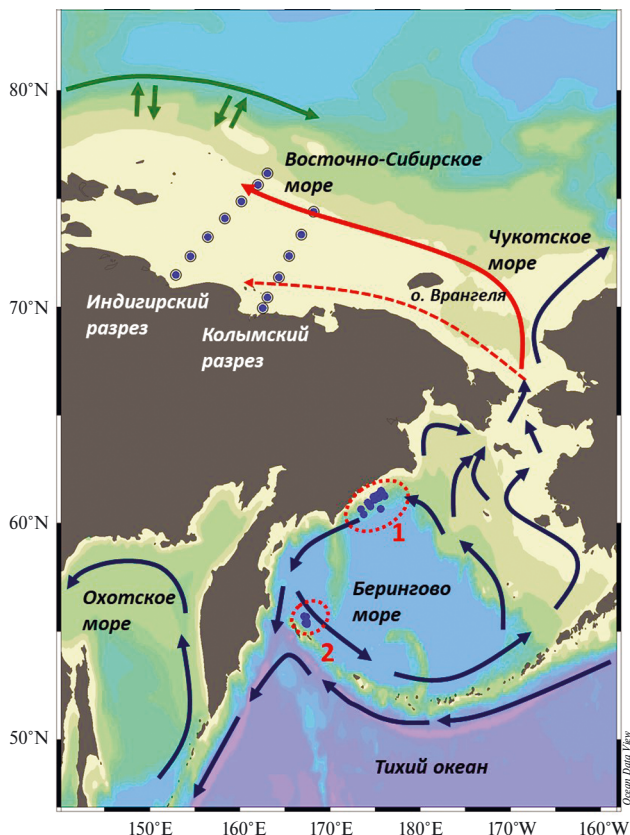


Рис. 1. Район исследований и расположение станций — Индигирский и Колымский разрезы в Восточно-Сибирском море и полигоны в Беринговом море (обведено пунктиром: 1 — район Корякского шельфа, 2 — район Командорских островов). Синие стрелки — течения в Беринговом море и соседних акваториях (Tazoe et al., 2022; Nishioka et al., 2021 и др.), зеленые и красные стрелки — потоки вод атлантического и тихоокеанского происхождения соответственно (Kinney et al., 2022).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изотопный состав ($\delta^{13}\text{C}$) и концентрация DIC были определены методом масс-спектрометрии в постоянном потоке гелия на приборе DeltaV+ (Thermo, Германия). Точность определения величин $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$ и $[\text{DIC}]$ составляет $\pm 0.05\text{‰}$ и 4.5 отн.‰, соответственно. Исходные данные в табличном виде можно найти в наших работах (Дубинина и др., 2020, 2024).

Изотопные и концентрационные характеристики DIC в водах Берингова моря. По температуре, солености и изотопным ($\delta^{18}\text{O}$, δD) характеристикам нами были выделены несколько водных масс, циркулирующих в западной части Берингова моря. По TS параметрам воды в этой акватории аналогичны водам Камчатского течения, Охотского моря и западного субарктического

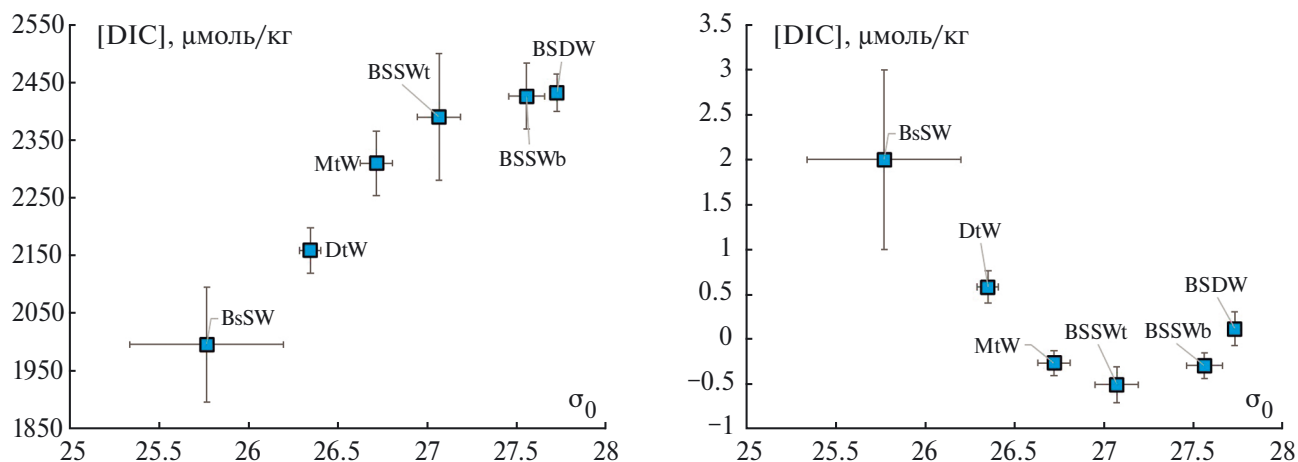


Рис. 2. Концентрации (а) и величины $\delta^{13}\text{C}$ (б) растворенного неорганического углерода в основных водных массах западной части Берингова моря (Дубинина и др., 2024). Обозначения вод: BsSW – субповерхностные летние; DtW – зимние; промежуточные – MtW и BSSWt, глубинные – BSSWb и BSDW.

кругового течения (Miura et al., 2002, Tazoe et al., 2022, Yamamoto et al., 2001, Mizuta et al., 2004). Водная толща Берингова моря имеет послойную структуру с наличием характерного слоя холодных зимних вод (например, Miura et al., 2002), которые формируются в процессе осенне-зимней конвекции, занимая глубины от поверхности до 150–200 м. Летом и осенью их верхняя граница заглубляется на 20–60 м за счет развития опресненного прогретого слоя летних поверхностных вод (например, Nomura et al., 2023). В изученных нами районах глубины нахождения ядер зимних вод составили от 100–120 до 120–160 м, вышележащие воды представлены летними субповерхностными водами. Непосредственно под зимними водами расположены более теплые и соленые промежуточные воды с переменными термохалинными и изотопными характеристиками вплоть до глубины ≈ 900 м. Ниже расположены глубинные воды, имеющие почти постоянные TS характеристики и величины $\delta^{18}\text{O}$ и δD (Дубинина и др., 2024). Для каждого типа вод Берингова моря нами были установлены интервалы вариаций $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$ и $[\text{DIC}]$ (рис. 2), что позволяет идентифицировать берингоморские водные массы по изотопно-концентрационным параметрам растворенного неорганического углерода.

Изотопные и концентрационные характеристики DIC вод Восточно-Сибирского моря. Шельф и прилегающие акватории Восточно-Сибирского моря сильно опреснены стоком рек Лена, Индигирка и Колыма, параметры которого варьируют от 600 до 1100 $\mu\text{mol/kg}$ для $[\text{DIC}]$ и от -3 до -8‰ для $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$ в зависимости от пропорции смешения вод разных рек (Дубинина и др., 2020).

За счет смешения речного стока с морскими водами формируется спектр составов с переменными значениями $[\text{DIC}]$ и $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$, на которые могут накладываться процессы взаимодействия с CO_2 атмосферы, первичной продукции или окисления органического вещества. Однако в первом приближении можно попытаться рассмотреть полученные составы как результат смешения усредненного речного стока Лены, Индигирки и Колымы с морскими водами разного происхождения. В качестве “морских” компонентов мы рассмотрели водные массы, которые потенциально могут присутствовать в данной акватории. Прежде всего, это воды атлантического происхождения (AW), циркулирующие в атлантическом секторе СЛО, распространяющиеся вдоль всего континентального склона Евразийской Арктики (Rudels, Carmack, 2022). Остальные типы вод соответствуют водным массам, циркулирующим в западной части Берингова моря, – поверхностные летние воды Корякского шельфа и Командорских островов, зимние воды, промежуточные и глубинные воды (Табл. 1). Поскольку промежуточные воды сильно варьируют по своим параметрам, для них были рассчитаны крайние варианты составов, чтобы получить характерный интервал значений. Для состава речного стока были приняты усредненные параметры, характеризующие сток Лены, Индигирки и Колымы (табл. 1).

На рис. 3 (а, б) приведены расчетные линии двухкомпонентного смешения речного стока с разными видами вод Берингова моря в координатах $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$ - $[\text{DIC}]$ и $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$ -S. Сравнение этих линий с наблюдаемыми величинами $[\text{DIC}]$

Таблица 1. Параметры, использованные для расчетов моделей консервативного смешения, результаты которых представлены на рис. 3 и 4

Тип вод	Глубина, м	Соленость, е.п.с.	$\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$, ‰	[DIC], $\mu\text{моль/кг}$
Атлантические воды, (AW)*	—	34.90	1.1	2200
Речной сток (RW)**	—	0	−5 (−3 ... −8)	800 (600...1100)
Тихоокеанские воды, (PW)**	—	33.0	—	2500
Воды Берингова моря***				
Поверхностные летние, Корякский шельф (BsSW-1)	10–50	32.8 ± 0.1	$+2.2 \pm 0.88$	1990 ± 90
Поверхностные летние, Командорские о-ва (BsSW-2)	10–90	33.04 ± 0.03	$+1.2 \pm 0.10$	2150 ± 40
Зимние (DtW)	50–150	33.05 ± 0.05	$+0.55 \pm 0.10$	2170 ± 10
Промежуточные (MtW) верхние	140–350	33.7	-0.3 ± 0.15	2300
Промежуточные (BSSWt) нижние	240–900	33.8–34.3	$-0.3 \dots -0.7$	2300–2500

*Bauch et al., 2015, Anderson et al., 1998
**усредненные данные для рек Лена, Индигирка, Колыма (Дубинина и др., 2020)
***Дубинина и др., 2024

и $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$ в водах Восточно-Сибирского моря показывает, что наиболее вероятными морскими компонентами, участвующими в смешении, являются атлантические воды, а также поверхностные, зимние и верхняя часть промежуточных вод Берингова моря. Важно, что описать составы вод Восточно-Сибирского моря в рамках смешения речного стока только с атлантическими водами (AW) без участия вод, аналогичных по характеристикам водам Берингова моря, невозможно.

В смешении не обнаруживается участия поверхностных летних вод Корякского шельфа и нижней части промежуточных вод — наблюдаемые

составы не лежат на линиях смешения RW-BsSW-1 и RW-BSSWt (рис. 3 а, б). Для относительно глубоководных вод Берингова моря (циркулирующих ниже 250–300 м, см. табл. 1) это вполне закономерно, т.к. они, скорее всего, не преодолевают естественный барьер, представленный мелководным северным шельфом моря (менее 100 м) и Беринговым проливом (максимальная глубина — 90 м, средняя — около 50 м). Из двух типов летних вод Берингова моря потенциальным участником смешения могут быть воды, аналогичные летним водам в районе Командорских островов. Этот вывод согласуется с направлениями течений в Беринговом море (рис. 1). Вероятно, поверхностные

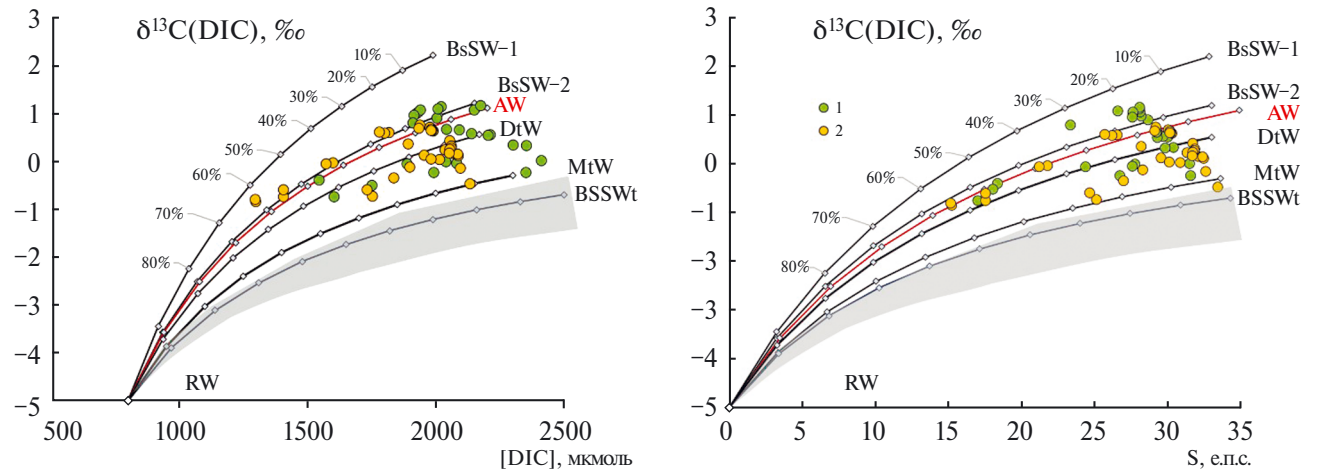


Рис. 3. Двухкомпонентное смешение стока рек Лена, Индигирка и Колыма с морскими водами разного происхождения. Обозначения: 1 — Колымский разрез, 2 — Индигирский разрез. Аббревиатуры названий вод — см. текст и табл. 1. Залитое поле — интервал смешения с промежуточными водами Берингова моря.

воды Корякского шельфа не попадают в зону кругового Берингоморского течения, и их изотопный сигнал с высокими величинами $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$ не прослеживается в тихоокеанском секторе СЛО. В результате основная часть наблюдаемых величин соответствует линиям смещения речного стока с летними водами открытого моря (аналогичными водам в районе Командорских о-вов), зимними водами, частично — с промежуточными водами Берингова моря. Таким образом, наши изотопные данные подтверждают присутствие разнообразных берингоморских вод в Восточно-Сибирском море, что согласуется с представлениями о путях их распространения в Восточную Арктику через акваторию Чукотского моря (Woodgate 2013; Aksenov et al., 2015 и др.). Нахождение данных вод в Восточно-Сибирском море во многом определяет их дальнейшую судьбу, поскольку отсюда они могут перемещаться с течениями трансполярного дрейфа к проливу Фрама и далее — в северные моря Атлантического океана. На возможность такого перемещения тихоокеанских вод также указывают данные по геохимическим трассерам, например, Ва (Taylor et al., 2003).

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТИХООКЕАНСКИХ ВОД В АКВАТОРИИ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ

Поскольку параметры $[\text{DIC}]$ и $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$ могут изменяться в зависимости от интенсивности процессов первичной продукции, окисления органического вещества и обмена с CO_2 атмосферы, расчет моделей смещения для DIC может нести определенную погрешность, особенно для верхних горизонтов вод. Кроме того, и для речного стока, и для спектра берингоморских вод наблюдается широкий диапазон характеристик DIC. Тем не менее оценка пропорций смещения трех крайних членов — речного стока (RW), атлантических (AW) и тихоокеанских (PW) вод представляет интерес для того, чтобы получить, пусть и в первом приближении, представление о пространственном распределении этих трех главных водных компонентов в акватории Восточно-Сибирского моря. Оценку можно провести с использованием системы линейных уравнений:

$$X_{\text{RW}} + Y_{\text{AW}} + Z_{\text{PW}} = 1, \quad (1)$$

$$S_{\text{SA}} = Y_{\text{AW}} * S_{\text{AW}} + Z_{\text{PW}} * S_{\text{PW}}, \quad (2)$$

$$[\text{DIC}]_{\text{SA}} = X_{\text{RW}} * [\text{DIC}]_{\text{RW}} + Y_{\text{AW}} * [\text{DIC}]_{\text{AW}} + Z_{\text{PW}} * [\text{DIC}]_{\text{PW}}, \quad (3)$$

где X_{RW} , Y_{AW} , Z_{PW} — доля каждого из компонентов в смеси, S_{SA} и $[\text{DIC}]_{\text{SA}}$ — соленость и концентрация DIC в конкретном образце воды, S_{AW} и S_{PW} — соленость атлантических и тихоокеанских вод, $[\text{DIC}]_{\text{RW}}$, $[\text{DIC}]_{\text{AW}}$, и $[\text{DIC}]_{\text{PW}}$ — концентрации DIC в соответствующем крайнем компоненте. Численные характеристики компонентов RW, AW и PW приведены в табл. 1. Для PW были взяты значения S_{PW} , близкие к солености галоклина арктических вод, а $[\text{DIC}]_{\text{PW}}$ — максимальные из наблюдаемых в промежуточных водах Берингова моря. Для речного стока приняты содержания DIC, промежуточные между установленными для стока Индигирки и Колымы (≈ 600 $\mu\text{моль/кг}$, Дубинина и др., 2020) и Лены (≈ 1100 $\mu\text{моль/кг}$, наши данные), поскольку влияние стока Лены, впадающей в юго-восточную часть моря Лаптевых, распространяется и на акваторию Восточно-Сибирского моря (Osadchiev et al., 2021). Результаты расчета приведены на рис. 4, где показано пространственное распределение величин Z_{PW} , X_{RW} и отношения f_{PW} , которое является долей тихоокеанской воды в образце в пересчете на морскую воду, т.е. без учета речного стока:

$$f_{\text{PW}} = (Z_{\text{PW}}) / (Z_{\text{PW}} + Y_{\text{AW}}). \quad (4)$$

Расчет показал адекватное распределение всех трех параметров на колымском и индигирском разрезах. Вполне закономерно выглядит распределение доли речных вод, которая около устьевых зон достигает 40–50%. Характерна также приуроченность речных вод к верхним горизонтам, в которых даже на расстоянии около 300 км и более от устья реки сохраняется до 20% речного компонента (рис. 4 а, б). Присутствие тихоокеанских вод также прослеживается на обоих разрезах, причем максимальная доля Z_{PW} в образце наблюдается в водах, максимально удаленных от сибирского берега к континентальному склону (рис. 4 в, г). Небольшие аномалии величины Z_{PW} наблюдаются также в 100–200 км от устьев рек, где глубина моря не превышает 20 м. Вполне вероятно, что эти аномалии, по крайней мере, частично, являются результатом накопления DIC при модификации вод на шельфе за счет формирования и выноса льда (Дубинина и др., 2020), так как именно в этом месте колымский и индигирский разрезы пересекает стационарная Великая Сибирская полынья (например, Zhang et al., 2021).

Центральная часть обоих разрезов представлена атлантическими водными массами, и доля Z_{PW} здесь опускается ниже 0.2–0.4. Соотношение тихоокеанского и атлантического компонентов наиболее отчетливо отражается параметром f_{PW}

(рис. 4 д, е), который, по сути, является характеристикой структуры морского компонента без его речной составляющей. Распределение этого параметра показывает “ядра” преимущественно тихоокеанских вод, которые приурочены к удаленным от континента зонам разрезов. Возможно, что они также составляют аномалии, наблюдающиеся вблизи устьевых зон рек, но, принимая во внимание активную модификацию вод на шельфе, утверждать это наверняка нельзя. Полученная картина показывает, что основная часть тихоокеанских вод распространяется с востока на запад севернее острова Врангеля, создавая аномалии в удаленных от берега частях разрезов, однако возможно, что существует подток тихоокеанских вод и со стороны южной оконечности острова (пунктирная стрелка на рис. 1). Этот вывод нельзя назвать полностью подтвержденным, но он

хорошо согласуется с результатами предыдущих гидрофизических измерений (Kinney et al., 2022).

Стоит отдельно отметить, что на обоих рассматриваемых разрезах в Восточно-Сибирском море с глубинами до 50 метров регистрируются не непосредственно атлантические и тихоокеанские воды, а их вклад в формирование локальной водной массы. Действительно, характерные глубины распространения и тихоокеанских (> 50 м), и атлантических (> 150 м) водных масс в исследуемом регионе гораздо больше, чем глубины мелководного шельфа Восточно-Сибирского моря (Wang et al., 2021). Тем не менее процессы перемешивания и водообмена между континентальным склоном и шельфом приводят к накоплению определенной доли этих водных масс и в рассматриваемых мелководных районах моря. Более детальный анализ этого вопроса требует как специализированных гидрофизических измерений,

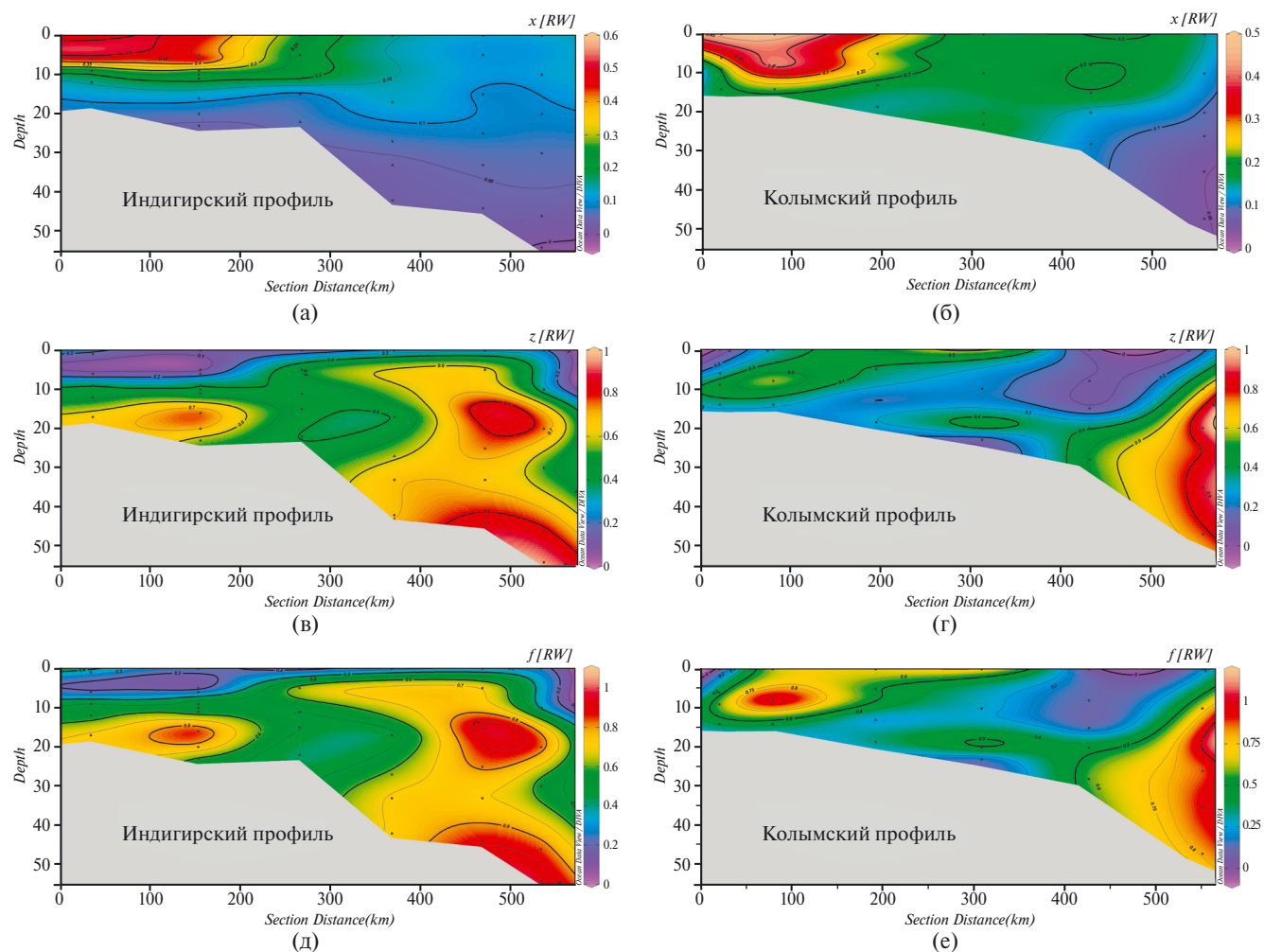


Рис. 4. Пространственное распределение в водах Индигирского и Колымского разрезов: а, б — доли речных вод (X_{RW}) в образце; в, г — доли тихоокеанских вод (Z_{PW}) в образце; д, е — доли тихоокеанских вод (f_{PW}) в неопресненной морской воде.

так и исследования распределения концентраций биогенных элементов, которые являются трассерами атлантических и тихоокеанских вод в Восточно-Сибирском море.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то что растворенный неорганический углерод (DIC) является индикатором процессов, протекающих на границе раздела океан-атмосфера, фотосинтеза, минерализации органического вещества и растворения карбонатов, в ряде случаев он может вести себя почти как консервативный параметр, например, в глубинных океанских водах (Kroopnick, 1985; Bostok et al., 2010). Когда процессы физического смешения более интенсивно влияют на поведение изотопно-концентрационной системы DIC, чем другие факторы, можно, в качестве первого приближения, использовать величины [DIC] и $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$ в качестве индикаторов смешения и в мелководных акваториях. Мы применили данный подход для вод Восточно-Сибирского моря, где процессы опреснения и смешения атлантических и тихоокеанских вод происходят очень активно. В результате нам удалось описать вариации [DIC] и $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$ в данном районе при помощи модели трехкомпонентного смешения. Конечно, примененный подход не учитывает некоторых факторов, например, влияния процессов модификации вод при замерзании, поэтому к конкретным расчетным данным надо подходить крайне осторожно. Тем не менее в первом приближении мы получаем адекватную оценку пространственного распределения тихоокеанских вод. По нашим данным, они распространяются с востока на запад примерно до 160 градуса восточной долготы, а возможно, и западнее, огибая остров Врангеля как с севера, так и с юга. Наши данные показывают, что в Восточно-Сибирском море обнаруживается спектр Берингоморских вод, начиная с летних поверхностных вод открытого моря, выносимых к северному шельфу круговым Берингоморским течением, и заканчивая верхними промежуточными водами, которые могут попадать в зону северного шельфа моря за счет апвеллинга или активного перемешивания (Дубинина и др., 2024). Кроме того, важную роль должны играть особенности ветрового транспорта вод на шельфе Восточной Арктики и в тихоокеанском секторе СЛО (Rudels, Carmack, 2022 и др.), а также специфика поверхностных и глубинных течений в районе Чукотского моря.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны академику М.В. Флинту — организатору 69 рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш”, организаторам 82 рейса НИС “Академик Лаврентьев”, командам и капитанам судов, а также составам гидрофизических отрядов, работавших в этих рейсах, за возможность отбора материала для исследований и предоставление гидрофизических данных.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00001, <https://rscf.ru/project/23-17-00001/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aksenov Y., Karcher M., Proshutinsky A., Gerdes R., de Cuevas B., Golubeva E., Kauker F., Nguyen A.T., Platonov G.A., Wadley M., Watanabe E., Coward A.C. Arctic pathways of Pacific Water: Arctic Ocean Model Intercomparison experiments // J. Geophys. Res. Oceans. 2016. V. 121. P. 27–59. doi:10.1002/2015JC011299.
2. Anderson L.G., Olsson K., and Chierici M. A carbon budget for the Arctic Ocean // Global Biogeochem. Cycles. 1998. V. 12. Is. 3. P. 455–465.
3. Bauch D., Polyak L., Ortiz J.D. A baseline for the vertical distribution of the stable carbon isotopes of dissolved inorganic carbon ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) in the Arctic Ocean // Arktos. 2015. V. 1. P. 15. doi.org/10.1007/s41063-015-0001-0
4. Bostock H.C., Opdyke B.N., Williams M.J.M. Characterizing the intermediate depth waters of the Pacific Ocean using $\delta^{13}\text{C}$ and other geochemical tracers // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2010. V. 57. Is. 7. P. 847–859. doi:10.1016/j.dsr.2010.04.005
5. Chu G., Luo X., Zheng Z., Zhao W., Wei H. Causes of increased dissolved inorganic carbon in the subsurface layers in the western shelfbreak and high latitudes basin in the Arctic Pacific sector // Environmental Research Letters. 2021. V. 16. P. 104008. doi.org/10.1088/1748-9326/ac2408
6. Ge T., Luo C., Ren P., Zhang H., Fan Di, Chen H., Chen Z., Zhang J., Wang X. Stable carbon isotopes of dissolved inorganic carbon in the Western North Pacific Ocean: Proxy for water mixing and dynamics // Front. Mar. Sci. 2022. 9:998437. doi: 10.3389/fmars.2022.998437
7. Kinney J.C., Assmann K.M., Maslowski W., Björk G., Jakobsson M., Jutterström S., Lee Y. J., Osinski R., Semiletov I., Ulfssbo A., Wählström I., Anderson L.G. On the circulation, water mass distribution, and nutrient concentrations of the western Chukchi Sea, Ocean Sci., 18, 29–49 <https://doi.org/10.5194/os-18-29-2022>, 2022
8. Kroopnick, P.M. The distribution of $\delta^{13}\text{C}$ of ΣCO_2 in the world oceans // Deep-Sea Res. 1985. V. 32. P. 57–84.
9. Miura T., Suga T., Hanawa K. Winter Mixed Layer and Formation of Dichtothermal Water in the Bering Sea // Journal of Oceanography. 2002. V. 58. P. 815–823.

10. Mizuta G., Ohshimab K.I., Fukamachib Y., Itoha M., Wakatsuchib M. Winter mixed layer and its yearly variability under sea ice in the southwestern part of the Sea of Okhotsk // *Continental Shelf Research*. 2004. V. 24. P. 643–657.
11. Nishioka J., Obata H., Hirawake T., Kondo Y., Yamashita Y., Misumi K., Yasuda I. A review: iron and nutrient supply in the subarctic Pacific and its impact on phytoplankton production // *J. Oceanography*. 2021. V. 77. P. 561–587. doi.org/10.1007/s10872-021-00606-5
12. Nomura D., Kawaguchi Y., Webb A. et al, Li Y., Schmidt K., Droste E.S., Chamberlain E.J. et al. Meltwater layer dynamics of a central Arctic lead: Effects of lead width variation and re-freezing and mixing events during late summer // *Elem. Sci. Anth.* 2023. V. 11. https://doi.org/10.1525/elementa.2022.00102.
13. Osadchiev A.A., Frey D.I., Spivak E.A., Shchuka S.A., Tilinina N.D., Semiletov I.P. Structure and inter-annual variability of the freshened surface layer in the Laptev and East-Siberian seas during ice-free periods. *Frontiers in Marine Science*. 2021. Vol. 8. 735011. doi: 10.3389/fmars.2021.735011
14. Rudels B., Carmack E. Arctic Ocean Water Mass Structure and Circulation // *Oceanography*. 2022. V. 35. No. 3–4. P. 52–65. doi.org/10.5670/oceanog.2022.116
15. Taylor J.R., Falkner K.K., Schauer U., Meredith M. Quantitative considerations of dissolved barium as a tracer in the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. Is. C12. doi:10.1029/2002JC001635
16. Tazoe H., Obata H., Hara T., Inoue M., Tanaka T., Nishioka J. Vertical Profiles of 226Ra and 228Ra Activity Concentrations in the Western Subarctic Gyre of the Pacific Ocean // *Front. Mar. Sci.* 2022. V. 9. P. 824862. doi: 10.3389/fmars.2022.824862
17. Wang X., Zhao J., Lobanov V.B., Kaplunenko D., Rudykh Y.N., He Y., Chen X. Distribution and transport of water masses in the East Siberian Sea and their impacts on the Arctic halocline. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126, e2020JC016523. https://doi.org/10.1029/2020JC016523
18. Woodgate R. (2013) Arctic Ocean Circulation: Going Around At the Top Of the World. *Nature Education Knowledge* 4(8):8
19. Yamamoto M., Tanaka N., Tsunogai S. Okhotsk Sea intermediate water formation deduced from oxygen isotope systematics // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 31075–31084.
20. Zhang Y., Zhang Y.Y., Xu D.Y., Chen C.S., Shen X.Y., Hu S., Chang L., Zhou X.Q., Feng G.P. Impacts of atmospheric and oceanic factors on monthly and interannual variations of polynya in the East Siberian Sea and Chukchi Sea. *Advances in Climate Change Research*, 12(4), 527–538.
21. Дубинина Е.О., Коссова С.А., Мирошников А.Ю., Авдеенко А.С., Чижова Ю.Н. Растворенный неорганический углерод ([DIC], $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$) в водах восточной части Восточно-Сибирского моря // *Геохимия*. 2020. Т. 65 № 8. С. 731–751. DOI: 10.31857/S0016752520080051
22. Дубинина Е.О., Коссова С.А., Чижова Ю.Н., Авдеенко А.С. Растворенный неорганический углерод ($\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$, [DIC]) в водах западной части Берингова моря. 2024, *Океанология*, в печати

PACIFIC WATERS IN THE EAST SIBERIAN SEA: IDENTIFICATION BY $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$ AND [DIC]

Corresponding Member of the RAS E. O. Dubinina^{a, #}, S. A. Kossova^a, A. A. Osadchiev^{a, b}, Yu. N. Chizhova, A. S. Avdeenko^a

^a*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[#]*E-mail: elenadelta@gmail.com*

The estimates of the scale and distribution of Bering Sea waters in the Pacific sector of the Arctic Ocean were made using the high-precision data on the isotopic composition and concentration of dissolved inorganic carbon. Despite the fact that $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$ and [DIC] are not classic conservative tracers, in the East Siberian Sea, which is a zone of active interaction of river runoff with sea waters, these parameters can indicate the presence of sea waters not only of Atlantic, but also of Pacific origin, similar to the waters of the Bering Sea. Using a three-component mixing model, the spatial distribution of Pacific, Atlantic and river waters along two sections of the East Siberian Sea was estimated. The Pacific component extends from east to west to approximately 160 degrees east longitude, and possibly further west, skirting Wrangel Island not only from the north, but also possibly from the south. In the East Siberian Sea, waters similar to the open sea Bering summer surface waters are found, which are carried to the northern shelf by the circular Bering Sea Current, and upper intermediate waters, which can enter the zone of the northern shelf of the sea due to upwelling or active mixing.

Keywords: Arctic, Pacific sector of Arctic Ocean, dissolved inorganic carbon, DIC, $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$, Bering Sea, East-Siberian Sea, river runoff, seawater circulation