

УДК 551.465

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПРЕСНОГО КОМПОНЕНТА В ЭСТУАРИЯХ РЕК ОБЬ И ЕНИСЕЙ И ВОДАХ ПРИЛЕГАЮЩИХ ЗОН КАРСКОГО МОРЯ ПО ИЗОТОПНЫМ (δD , $\delta^{18}O$) ДАННЫМ

© 2025 г. С. А. Коссова^{а, *}, Е. О. Дубинина^а^а Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии
Российской академии наук, Москва, Россия

* e-mail: sonch_1@rambler.ru

Поступила 25.04.2024 г.

После доработки 03.06.2024 г.

Принята к публикации 03.10.2024 г.

Рассмотрены способы оценки изотопных параметров (δD , $\delta^{18}O$) пресного компонента в зоне перехода река-море на примере материалов, отобранных в конце июля 2016 г. вдоль двух меридиональных разрезов, протянувшихся от эстуариев рек Обь и Енисей до центра Карского моря. Изотопные параметры стока этих рек являются контрастными ($\delta^{18}O = -15.0 \pm 0.3\text{‰}$, $\delta D = -112.7 \pm 2.1\text{‰}$ для Оби и $\delta^{18}O = -18.9 \pm 0.6\text{‰}$, $\delta D = -142.2 \pm 4.3\text{‰}$ для Енисея). Установлено, что речные воды, находящиеся в пределах поверхностного слоя морской воды, не успевают гомогенизироваться. Например, в центральной части Енисейского разреза, пересекающего Обско-Енисейский плюм, доля вод Оби в пресном компоненте (ПК) составляет 60%. В пределах речных эстуариев ПК является гомогенным только в верхнем слое вод (менее 5 м), с глубиной вариации величин $\delta^{18}O$ (ПК) достигают 16‰ для Обской губы и 12‰ для Енисейского залива, превышая годовой ход сезонных вариаций этой величины в речной воде. В придонном слое для эстуарных зон обеих рек наблюдается присутствие единого ПК с изотопно-легкими характеристиками региональных атмосферных осадков, который поставляется в зону эстуариев с водами Карского моря.

Ключевые слова: изотопы кислорода, водорода, речной сток, Карское море, пресный компонент**DOI:** 10.31857/S0030157425010051, **EDN:** DQEZDF

ВВЕДЕНИЕ

Пресноводный сток с континентов является не только индикатором климатических изменений, распространения антропогенного загрязнения и отложения терригенного материала в зоне континентального шельфа [13, 23, 25, 30], но и влияет на биологические, геохимические и физические параметры вод арктических морей. Одним из них является Карское море – сильно опресненный морской бассейн [4, 8, 9], в который впадает две крупные сибирские реки – Обь и Енисей, поставляющие на арктический шельф примерно четверть от всего континентального стока в Восточной Арктике [15, 29]. В совокупности с остальными источниками пресных вод – атмосферными осадками или талыми водами морских или речных льдов, речной сток формирует так называемый общий пресный компонент (ПК) Карского моря. Главной особенностью ПК Карского моря является различие изотопных параметров двух основных источников речных

вод – Оби и Енисея. Это различие обусловлено тем, что изотопные параметры речного стока преимущественно наследуют информацию о вкладе атмосферных осадков и подземных вод в водный баланс реки [18, 31] по всей площади водосбора. Водосборы Оби и Енисея занимают большие площади, протяженные как в меридиональном, так и в широтном направлении, занимая разные климатические зоны, что приводит к разгрузке в один морской бассейн двух крупных рек с контрастными изотопными ($\delta^{18}O$, δD) характеристиками воды (рис. 1).

Работы, формирующие представление об изотопных параметрах речного стока в Карское море малочисленны и, главным образом, рассматривают изотопную систему кислорода, а оценки изотопного состава водорода практически не встречаются в литературе. В таблице 1 систематизированы основные данные об изотопных параметрах ($\delta^{18}O$, δD) вод Оби и Енисея, полученные как в зоне перехода река-море [1, 4, 8, 9], так



Рис. 1. Площади водосбора Оби (I) и Енисея (II), по данным ArcticGRO [16].

и в районах, расположенных непосредственно в речных эстуариях [11, 20]. Несмотря на то, что опубликованных данных по изотопному составу кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) существенно больше, они не всегда воспроизводятся в работах разных авторов.

Полученные нами предварительные оценки изотопных параметров вод Оби и Енисея в зоне перехода река-море [4] также требуют уточнений, поскольку для вод Енисея было получено бимодальное распределение величин $\delta^{18}\text{O}$ и δD , которые для одной из станций оказались близки к водам

Оби (табл. 1). Возможность появления в Енисейском заливе вод Карского моря, опресненных стоком Оби, уже обсуждалась ранее [25, 26], но это наблюдение нуждается в подтверждении.

Отсутствие системной информации об изотопных параметрах речного стока в Карское море и противоречивость опубликованных данных определили задачи настоящей работы, которые состоят в проверке разных подходов к оценке изотопных параметров (δD , $\delta^{18}\text{O}$) стока Оби и Енисея и установлении их усредненных значений, пригодных для модельных оценок. Специальное внимание нами уделено роли речных вод и других опреснителей в формировании изотопных характеристик ПК в зоне перехода река-море. Решение этих задач на примере Оби и Енисея дополняет существующие представления о распределении опресняющих компонентов в пределах Арктических акваторий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материал для исследований был собран в 66-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2016 г.) при помощи батометров Нискина океанографического зонда SBE911 с комплексом Rosette 32. Образцы опресненных морских вод

Таблица 1. Опубликованные оценки изотопных параметров вод Оби и Енисея

Источник	Период отбора	Метод оценки*	Число данных	δD , ‰	$\delta^{18}\text{O}$, ‰
Обь					
Bauch et al., 2005 [8]	2000 (август-сентябрь)	1	н/д	—	–16.1
	2001(август-сентябрь)	1	н/д	—	–15.7
Bauch et al., 2003 [9]	1999 (август-сентябрь)	1	34	—	–16.8
Брезгунов и др., 1980 [1]	1976 (июль-август)	2	8	—	–16.4
	1977 (июль-август)	2	5	—	–16.1
	1977 (март)	2	11	—	–14.6
Cooper et al., 2008 [11]	2003–2006	3	17	—	–14.9
Дубинина и др., 2017 [4]	2014 (август-сентябрь)	4	1	–131.4	–17.6
Енисей					
Bauch et al., 2005 [8]	2000 (август-сентябрь)	1	н/д	—	–17.0
	2001(август-сентябрь)	1	н/д	—	–17.0
Bauch et al., 2003 [9]	1999 (август-сентябрь)	1	10	—	–18.1
Cooper et al., 2008 [11]	2003–2006	3	17	—	–18.4
Дубинина и др., 2017 [4]	2014 (август-сентябрь)	4	2	–134.4	–17.7
				–120.7	–15.8

*1 – Линейная экстраполяция данных на $S = 0$; 2 – усреднение результатов прямых измерений величин $\delta^{18}\text{O}$ в образцах эстуарных вод с $S < 1\text{‰}$; 3 – средневзвешенные значения величин $\delta^{18}\text{O}$ в пресных водах на речных станциях; 4 – результаты прямых измерений величин $\delta^{18}\text{O}$ в образцах эстуарных вод.

отобраны на станциях, расположенных вдоль двух меридиональных разрезов, протянувшихся от речных эстуариев к центру Карского моря. Длина Обского разреза составила 453 км, а Енисейского — 472 км (рис. 2). Изотопный анализ кислорода образцов был выполнен методом изотопного уравнивания в режиме CF-IRMS с применением масс-спектрометра DELTA V+ и опции GasBench II. Изотопный анализ водорода выполнен в режиме DI IRMS на масс-спектрометре DELTAplus (Thermo, Германия) после разложения микропроб воды на горячем хrome (H/Device). Все величины $\delta^{18}\text{O}$ и δD калиброваны в шкале «V-SMOW–V-SLAP» и определены с точностью ± 0.05 и $\pm 0.3\text{‰}$ соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Пространственное распределение изотопных (δD и $\delta^{18}\text{O}$) данных и солености вод Обского и Енисейского разрезов приведены на рис. 3. Наблюдаемое распределение солености свидетельствует о том, что воды изученных разрезов опреснены относительно вод атлантического происхождения (для северной Атлантики $S = 34.9$ е.п.с. по данным [3, 4]) на всех глубинах и по всей длине изученных разрезов. Как следовало ожидать, максимальное опреснение проявлено в поверхностном слое, где величины солености достигают минимальных значений (5 е.п.с и менее). Простая оценка содержания пресного компонента ($X_{\text{ПК}}$) в изученных образцах может быть получена по балансу солености:

$$X_{\text{ПК}} = \frac{S_{\text{Atlantic}} - S_{\text{Sample}}}{S_{\text{Atlantic}}}, \quad (1),$$

где S_{Atlantic} — соленость вод атлантического происхождения, поступающих в Карское море из Баренцева (34.9 е.п.с., по данным [3, 4]); S_{Sample} — соленость образца. Оценки по уравнению (1) превышают 90% в зоне речных эстуариев и падают до 1% и менее в придонных водах центральной части изученных разрезов.

Изотопные параметры δD и $\delta^{18}\text{O}$ (рис. 3), являясь консервативными трассерами, распределены в пространстве аналогично солености [12]. Максимальные значения величин δD и $\delta^{18}\text{O}$ на Обском меридиональном разрезе составили соответственно 0.0 и -2.1‰ в водах придонного горизонта (175 м) на станции 5308, максимально удаленной от устья Обской губы. Соленость придонных вод на этой станции составляет 34.22 е.п.с. В Енисейском заливе максимальные значения величин δD и $\delta^{18}\text{O}$ тоже наблюдаются в придонных водах (60 м) на станции 5353, максимально удаленной

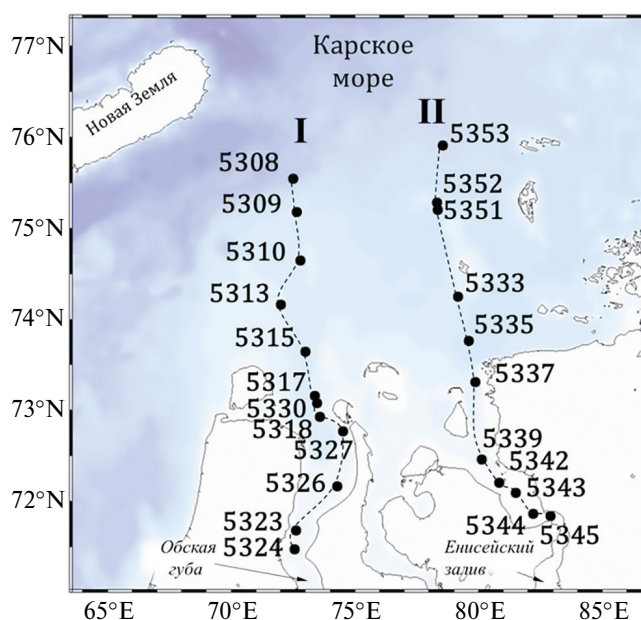


Рис. 2. Расположение изученных разрезов в акватории Карского моря (66-рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»). I — Обский разрез; II — Енисейский разрез.

от речного устья и составляют -0.4 и -3.3‰ соответственно, при солености 33.74 е.п.с.

Минимальные значения величин δD и $\delta^{18}\text{O}$ и солености были получены для вод поверхностного слоя на станциях самых южных участков изученных разрезов. Станции 5323, 5324, 5326, 5327 находятся непосредственно в Обской губе, на отдельных станциях (ст. 5323, 5324) глубина моря не превышает 15 м, и диапазон наблюдаемых величин солености составляет от 0.17 е.п.с. у поверхности до 31.10 е.п.с. в придонном слое толщи. Величины δD и $\delta^{18}\text{O}$ также изменяются с глубиной и наиболее низкие значения характерны для вод поверхностного слоя: величины δD и $\delta^{18}\text{O}$ (ст. 5323) составляют -115.1‰ и -15.6‰ соответственно. Станции 5342, 5343, 5344, 5345, расположенные в Енисейском заливе, также характеризуются минимальными значениями величин δD и $\delta^{18}\text{O}$, полученными для вод поверхности (ст. 5342), они составляют -148.1‰ и -19.9‰ соответственно. Наибольшая глубина в этом районе достигает 19 метров (ст. 5345), а диапазон солености составляет от 0.44 до 31.97 е.п.с.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Оценка изотопных параметров речного стока

Из диаграмм, представленных на рис. 3 следует, что большая часть ПК сосредоточена в поверхностном слое вод, формируя так называемый

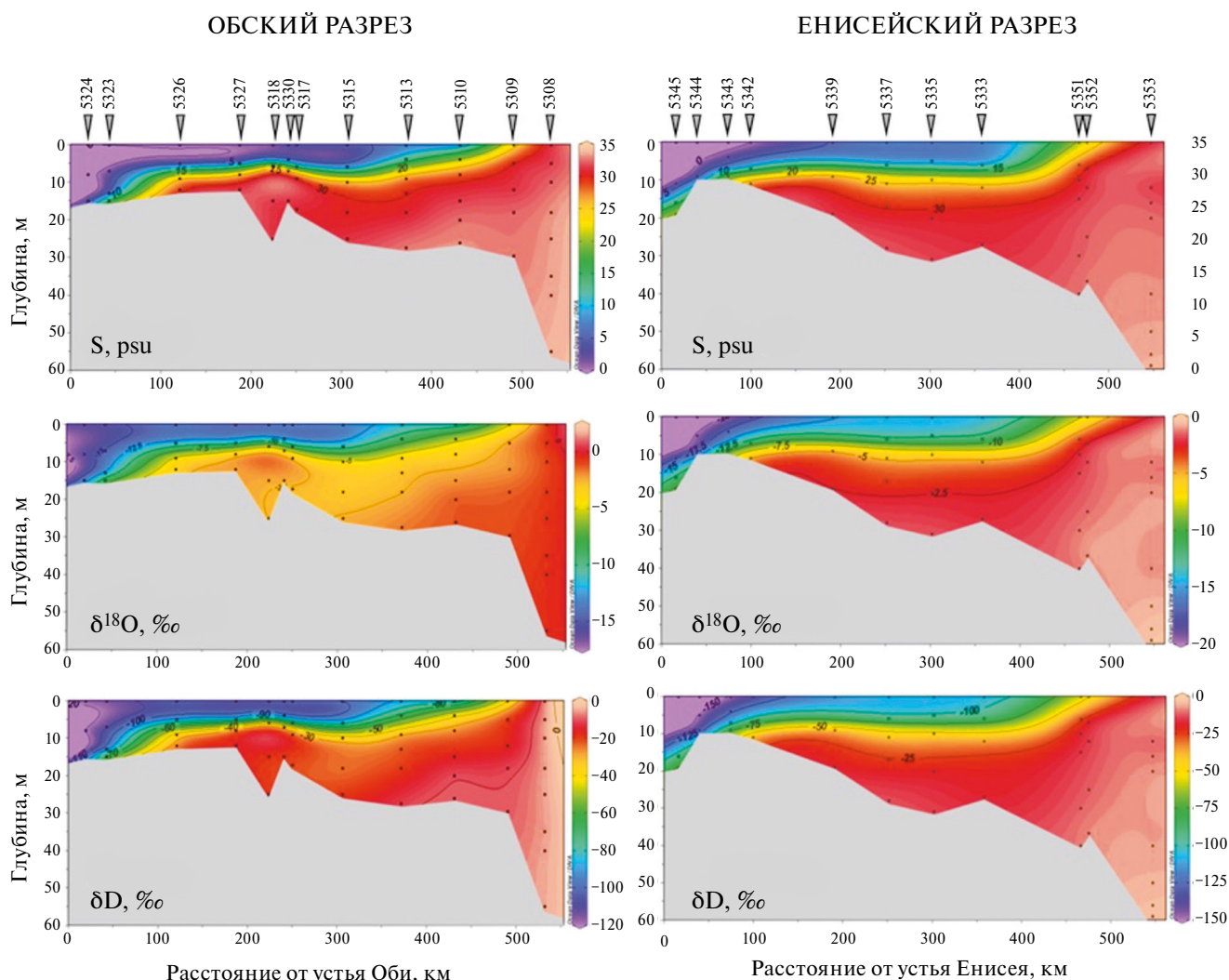


Рис. 3. Пространственное распределение солёности (S) и изотопных параметров ($\delta^{18}\text{O}$, δD) в водах Обского (А, Б, В) и Енисейского (Г, Д, Е) разрезов.

речной плум, регулярно наблюдаемый в Карском море [21, 26, 28]. Воды Оби и Енисея распространяются по поверхности моря, постепенно смешиваясь с нижележащими морскими водами. Это позволяет рассматривать воды Карского моря в зоне распространения речных плумов с позиции смешения атлантических вод, поступающих из Баренцева моря, с водами речного стока, главным образом, Оби и Енисея [4, 8, 29]. Двухкомпонентное смешение описывается линейным уравнением в координатах «изотопный состав-солёность», или δ - S [1, 8, 10]. Свободный член линейного уравнения будет близок к величинам $\delta^{18}\text{O}$ или δD общего пресного компонента, который в зоне речного плума представлен преимущественно речной водой. Уравнения связи δ - S и их статистические характеристики, полученные для вод Обского и Енисейского разрезов, приведены в таблице 2. Величины свобод-

ного члена в этих уравнениях представлены как усредненные параметры речного стока в таблице 3. Несмотря на высокие коэффициенты корреляции, приведенные в табл. 2, на рис. 4 видно, что строгая линейная связь изотопных параметров с солёностью в водах изученных разрезов отсутствует. Распределение точек на диаграммах этого рисунка указывает на отклонение от модели простого двухкомпонентного смешения и больше напоминает полином третьей степени с перегибом в области солёности 10–25 е.п.с. Данная ситуация, вероятно, отражает формирование ПК за счет смешения речных вод Оби и Енисея, разных по своим изотопным параметрам. В качестве дополнительного фактора, можно отметить возможное влияние вклада талых вод морского или речного льда, которые могут сохраняться в поверхностном опресненном слое до конца июля [5, 9, 17, 24].

Таблица 2. Уравнения связи изотопных характеристик с соленостью для вод Обского и Енисейского разрезов

Обский разрез (n = 61)	R ²
$\delta^{18}\text{O} = 0.41(\pm 0.01) S - 14.77(\pm 0.16)$	0.99
$\delta\text{D} = 3.09(\pm 0.04) S - 111.53(\pm 1.12)$	0.99
Енисейский разрез (n = 53)	
$\delta^{18}\text{O} = 0.53(\pm 0.01) S - 18.64(\pm 0.53)$	0.98
$\delta\text{D} = 3.98(\pm 0.09) S - 140.52(\pm 2.13)$	0.98

В области минимальной солености на диаграммах рис. 4 величины $\delta^{18}\text{O}$ и δD близки к величинам свободного члена в статистических уравнениях из табл. 2. Однако небольшой разброс данных в области минимальных соленостей, заметный на диаграммах рис. 4 показывает, что даже в зоне доминирования речного стока нельзя полностью исключать вклад в ПК других источников опреснения [2, 6]. По этой причине величины δD и $\delta^{18}\text{O}$, получаемые путем экстраполяции всех данных, полученных для разрезов или отдельных станций на нулевую соленость, можно использовать для оценки параметров речного стока, но с большой осторожностью. Наши оценки величин $\delta^{18}\text{O}$ и δD речного стока Оби и Енисея, полученные данным способом, приведены в табл. 3 (метод 1).

Кроме экстраполяции на нулевую соленость, можно использовать уравнение материального баланса, связывающего изотопные параметры и количественное соотношение пресных и соленых вод в каждом изучаемом образце [7, 9, 27]:

$$\delta_{\text{ПК}} = \delta^0 - \frac{\delta^0 - \delta_{\text{обр}}}{X_{\text{ПК}}}, \quad (2)$$

где $X_{\text{ПК}}$ — доля пресного компонента в образце, рассчитанная по балансу солености (1), $\delta_{\text{ПК}}$ — изотопный состав кислорода или водорода пресного компонента, δ^0 — изотопный состав кислорода или водорода исходной морской воды. В расчетах приняты его параметры, определенные для вод атлантического происхождения, циркулирующих в Баренцевом море $\delta\text{D} = 1.56 \pm 0.40\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O} = 0.25 \pm 0.1\text{‰}$ [3, 4].

Применение уравнения (2) к слабо опресненным водам (при $X_{\text{ПК}}$ менее 10%) приводит к высокой погрешности и получению нереальных оценок величин $\delta^{18}\text{O}$ и δD в пресном компоненте. Подобные образцы следует исключить из расчетов и провести анализ оставшихся данных, сгруппировав их по географическому или формальному (математическому) принципу. В первом случае мы полагаем, что в наиболее южных (эстуарных) частях разрезов вклад любых иных источников пресных вод, кроме вод конкретной реки, пренебрежимо мал. Изотопные параметры речных вод Оби и Енисея, полученные таким способом, приведены в табл. 3 (метод 2).

Критерием пригодности данных по формальному признаку служит отсутствие зависимости рассчитанных по уравнениям (1, 2) величин δD и $\delta^{18}\text{O}$ пресного компонента от его содержания в образце. На рис. 5 все рассчитанные величины δD и $\delta^{18}\text{O}$ ПК формируют две группы значений: к группе (I) относятся воды с содержанием ПК менее 60%, к группе (II) — воды, содержащие более 60% ПК. Видно, что воды первой группы имеют широкий диапазон вариаций величин δD и $\delta^{18}\text{O}$ ПК, а для второй характерны минимальные вариации величин δD и $\delta^{18}\text{O}$ ПК (рис. 5). Значительные вариации изотопных параметров ПК указывают

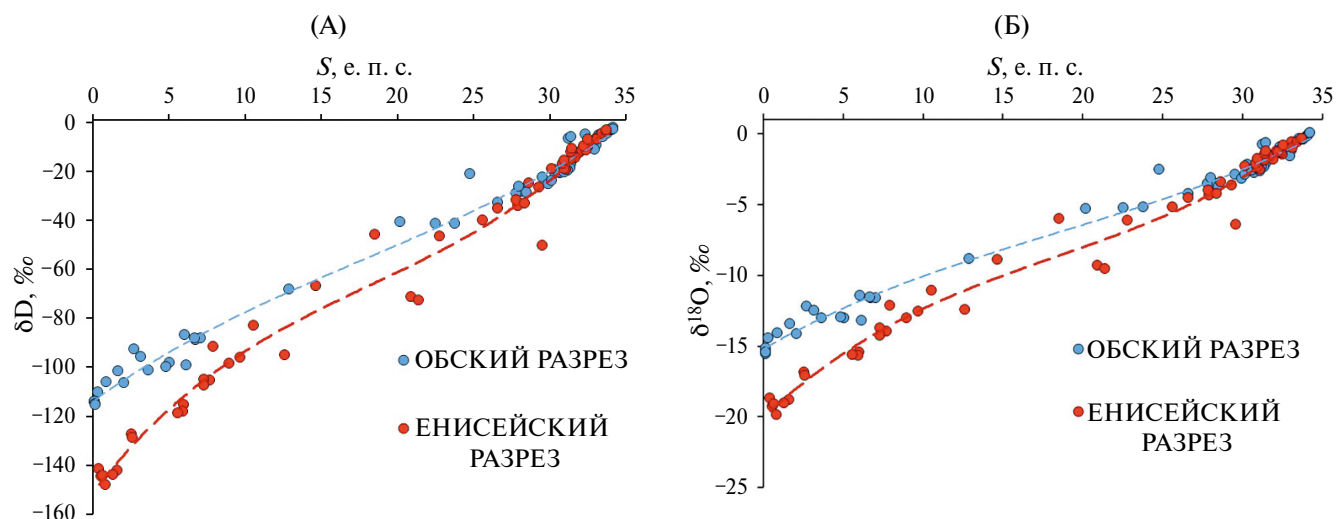
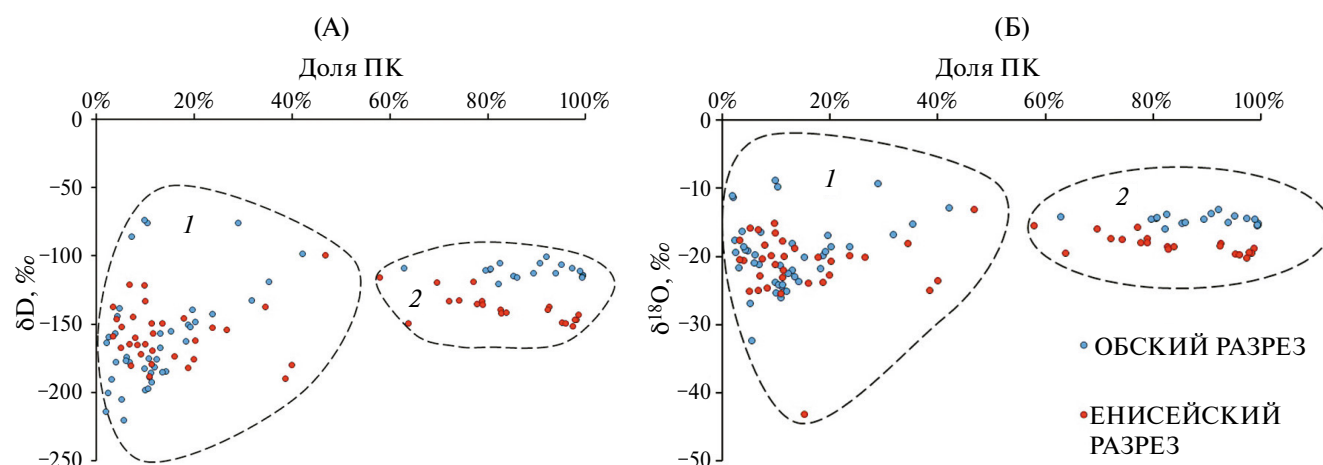
**Рис. 4.** Связь солености и изотопного состава водорода (А) и кислорода (Б) в водах изученных разрезов.

Таблица 3. Изотопные параметры речных вод, поступающих в Карское море

№	Метод оценки	Параметр, ‰	Обь		Енисей	
				n		n
1	Экстраполяция на $S = 0$ всех данных по разрезу	$\delta^{18}\text{O}$ δD	-14.8 ± 0.2 -111.5 ± 1.1	61	-18.6 ± 0.5 -140.5 ± 2.1	53
2	Расчет по (1, 2) с исключением по географическому признаку	$\delta^{18}\text{O}$ δD	-15.3 ± 0.4 -114.7 ± 1.6	6	-19.5 ± 0.7 -146.9 ± 4.7	7
3	Расчет по (1, 2) с исключением по формальному признаку	$\delta^{18}\text{O}$ δD	-14.8 ± 0.7 -112.0 ± 4.8	19	-18.5 ± 1.2 -139.2 ± 9.2	18
Среднее:		$\delta^{18}\text{O}$	-15.0 ± 0.3		-18.9 ± 0.6	
		δD	-112.7 ± 2.1		-142.2 ± 4.3	

**Рис. 5.** Зависимость величин δD (А) и $\delta^{18}\text{O}$ (Б) пресного компонента от его содержания в водах Обского и Енисейского разрезов. Пунктирные области — воды с содержанием ПК менее 60% (I) и более 60% (II).

на присутствие в нем пресных вод с разными изотопными характеристиками, которые проявляются на фоне отсутствия доминирования одного из источников ПК, в данном случае, речных вод. В образцах второй группы вариации изотопных параметров ПК минимальны, и это связано с превалированием речных вод над остальными источниками опреснения. Таким образом, мы можем принять, что точки второй группы представляют характеристики вод соответствующей реки: Обских для Обского, и Енисейских для Енисейского разрезов. Усредненные величины этих оценок δD и $\delta^{18}\text{O}$ ПК, приведены в табл. 3 (метод 3).

Распределение речных вод в Обско-Енисейском плюме

Средние оценки изотопных параметров речного стока Оби и Енисея на момент наблюдений (табл. 3) можно использовать как опорные величины δD и $\delta^{18}\text{O}$, позволяющие идентифицировать сток каждой из рек. Мы применили эти величины для оценки сохранности изотопно-

го сигнала вод Оби и Енисея в пределах единого речного плюма, формирующегося в Карском море за пределами эстуарных зон этих рек. Поступающий в Карское море речной сток распространяется, главным образом, в северном и северо-восточном направлении в виде плюмов, слабо перемешивающихся с нижележащими морскими водами [21, 28, 29]. В центральной части Карского моря происходит слияние плюмов Оби и Енисея в так называемый общий Обско-Енисейский речной плюм [21, 25, 28]. По некоторым оценкам считается, что в центральной части этого плюма доминируют воды реки Оби [26], хотя точных оценок содержания вод Оби и Енисея в общем плюме не имеется. Мы рассчитали вклад воды, поступающей из каждой реки, опираясь на допущение, что ПК в зоне Обско-Енисейского плюма состоит главным образом из вод Оби и Енисея. Расчет проведен для образцов, взятых в пределах поверхностного слоя (0–16 м), который частично представлен водами речного плюма [26]. Соленость этих вод не превышает 21 е.п.с., а доля

ПК достигает 60%. Результаты расчета показаны на рис. 6 в виде пространственного распределения в пределах плюма доли вод Оби в составе ПК (соответственно, картина распространения Енисейских вод будет обратной, поскольку допускался двухкомпонентный состав ПК).

Согласно расчету, доля вод Оби в составе ПК Обско-Енисейского плюма возрастает постепенно, достигая 60% на станциях 5333 и 5351, удаленных от начала Енисейского разреза более чем на 350 км. Таким образом, можно утверждать, что в пределах Енисейского разреза действительно наблюдается преобладание вод Оби над водами Енисея, а характер распределения Обских вод в пределах плюма показывает, что воды, выходящие из Обской губы, пересекают траекторию Енисейского плюма, накладываясь на него. При этом изотопные метки воды обеих рек остаются сохранными, указывая на гетерогенное состояние ПК в пределах единого плюма.

Распределение изотопных характеристик ПК с глубиной

Согласно полученным оценкам величин $\delta^{18}\text{O}$ и δD в пресном компоненте слабо опресненных вод обоих разрезов (область I на рис. 5), его изотопные параметры негомогенны, что позволяет предположить участие в процессах смешения вод Карского моря не только речных, но и других пресных вод. Наиболее отчетливо это проявляется при рассмотрении вод станций, расположенных в пределах эстуарных зон каждой из рек. На рис. 7 (а, б) приведены рассчитанные по уравнению (2) величины $\delta^{18}\text{O}(\text{ПК})$ в зависимости от глубины отбора для Обской губы и Енисейского залива

(картина распределения величин $\delta\text{D}(\text{ПК})$ выглядит аналогично). Для обеих рек наблюдается относительно гомогенное состояние ПК в пробах, отобранных из поверхностного слоя, которое, вероятно, обеспечивается перемешиванием речных вод течениями и ветровой нагрузкой. На глубинах более 5 м возникает существенный разброс величин $\delta^{18}\text{O}(\text{ПК})$, который нельзя объяснить погрешностями расчета, поскольку для всех этих образцов, в основном, характерна низкая соленость (от 0.17 до 6.72 е.п.с. в водах Обской губы и от 0.44 до 12.64 е.п.с. в Енисейском заливе).

В придонных горизонтах, особенно на выходе из эстуарной зоны, соленость повышается до 22.56–31.22 е. п.с в Обской губе и до 18.54–31.97 е.п.с. в Енисейском заливе. Поскольку и эти величины солености не способны привести к ошибочным оценкам изотопных параметров ПК, наблюдаемое глубинное распределение величин $\delta^{18}\text{O}(\text{ПК})$ и $\delta\text{D}(\text{ПК})$ не является артефактом и должно иметь объяснение.

Полученные оценки изотопных параметров ПК имеет смысл сравнить с интервалом сезонных вариаций речных вод. Для этого мы нанесли на рисунки 7а и 7б интервалы сезонных вариаций величины $\delta^{18}\text{O}$ в водах Оби и Енисея из открытой базы проекта ArcticGRO [16]. Нами были использованы данные наблюдений, полученные за период одного года, предшествующего моменту отбора образцов, т.е. с сентября 2015 г. по август 2016 г. включительно. Полученные интервалы сезонных вариаций для речных вод описывают данные только для поверхностного слоя (рис. 7). Состав ПК на глубинах более 5 м явно неоднороден – величины $\delta^{18}\text{O}(\text{ПК})$ имеют

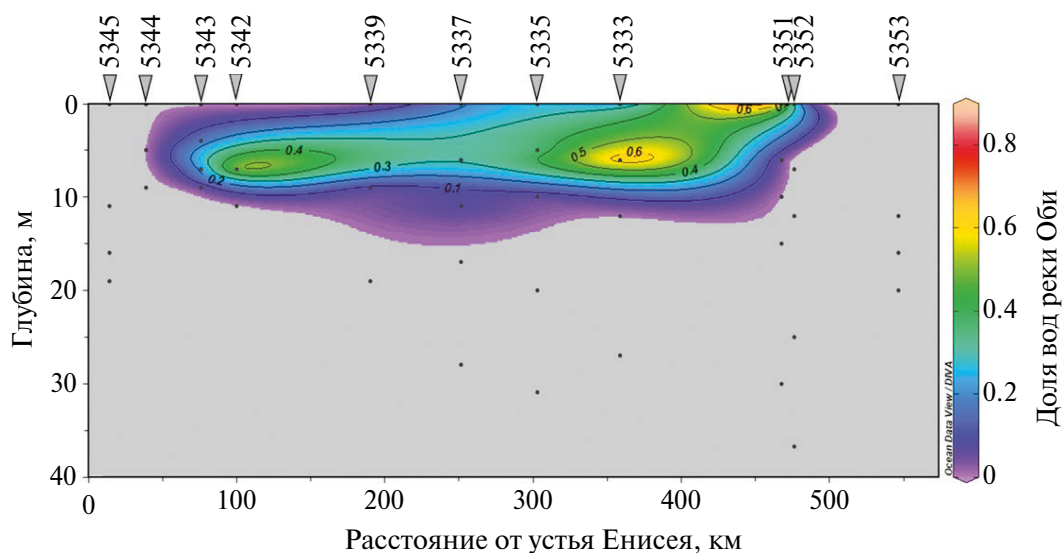


Рис. 6. Доля вод реки Оби в составе ПК Обско-Енисейского плюма в зоне его пересечения Енисейским разрезом.

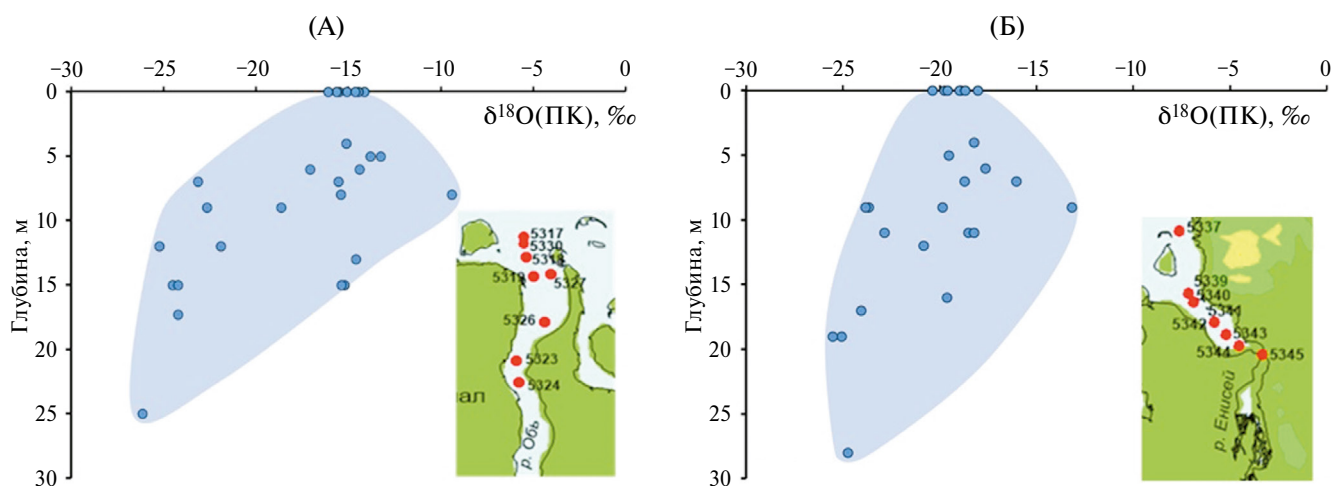


Рис. 7. Распределение расчетных величин $\delta^{18}\text{O}$ пресного компонента (ПК) в зависимости от глубины: (А) — Обская губа, (Б) — Енисейский залив. Пунктиром ограничен интервал вариаций величин $\delta^{18}\text{O}$ речной воды на станциях наблюдения ArcticGRO [16] за период с сентября 2015 г. до августа 2016 г., который охватывает годовой интервал, предшествующий отбору проб. На картах показаны южные участки изученных разрезов, находящиеся в пределах Обской губы (А) и Енисейского залива (Б).

значительный разброс и показывают небольшую тенденцию к понижению с ростом глубины. Общий интервал величин $\delta^{18}\text{O}$ (ПК) на глубинах более 5 м, как в Обской губе, так и в Енисейском заливе, существенно шире годового хода этого параметра в речной воде. Это означает, что пресный компонент, содержащийся в водах более глубоких горизонтов, очевидно, имеет не только речное происхождение.

Пространственное распределение величин $\delta^{18}\text{O}$ (ПК) показывает (рис. 8), что изотопно-облегченный пресный компонент приурочен к придонному слою и поступает в Обскую губу и Енисейский залив со стороны Карского моря.

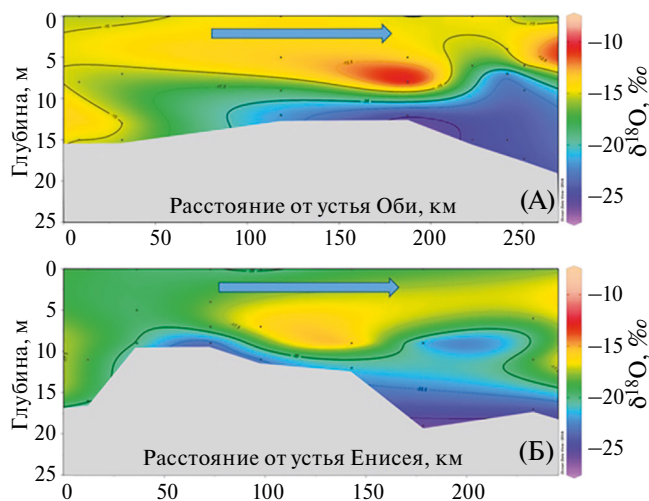


Рис. 8. Распределение величины $\delta^{18}\text{O}$ (ПК) в водах Обской губы (А) и Енисейского залива (Б). Стрелками обозначено направление течения рек.

Величины $\delta^{18}\text{O}$ около $-20\ldots-25\text{‰}$ отвечают составу атмосферных осадков высоких широт, которые частично опресняют воды Карского моря [2], а также среднему составу атмосферного компонента в Арктике -23‰ [14]. Более высокие величины $\delta^{18}\text{O}$ (ПК), наблюдаемые на горизонтах около 10 м, могут быть результатом вклада талого льда, который обогащен изотопом ^{18}O в равновесии с водой на величину около 2‰ [19, 22].

Пресный компонент преимущественно речного происхождения сохраняется, главным образом, в поверхностном слое воды эстуариев, наследуя спектр вариаций изотопных параметров речной воды предыдущих сезонов. Однако это не влияет на принципиальное соотношение изотопных характеристик стока двух рек: для поверхностных вод Оби характерны более высокие величины $\delta^{18}\text{O}$ ($\approx -15\text{‰}$), чем для Енисея ($\approx -18\ldots-20\text{‰}$). Для Обской губы также характерно наличие водных линз с повышенными величинами $\delta^{18}\text{O}$ пресного компонента, по-видимому, представленного талым речным льдом. Для вод Енисейского залива наличие водных прослоев с повышенными величинами $\delta^{18}\text{O}$ (ПК) выражено слабее, и может быть связано не только с присутствием талых вод речного льда, но и с затоком в Енисейский залив вод, опресненных в Обской губе, что уже отмечалось ранее [25].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, представленные в данной работе, получены по материалам одного рейса, собранным во время одного летнего сезона.

Следовательно, за пределами обсуждения остаются сезонные вариации, что не входило в задачи настоящей работы. Мы постарались показать, что в столь сложном бассейне как Карское море, даже в зоне преобладания речного стока (например, непосредственно в зонах речных эстуариев) опреснение не всегда можно рассматривать как процесс двухкомпонентного смешения морской и речной воды. Об этом говорит также установленное нами негетогенное распределение речных вод в пределах Обско-Енисейского плюма. Например, в центральной части Енисейского разреза, пересекающего Обско-Енисейский плюм, ПК представлен смесью 60% вод Оби и 40% вод Енисея.

Сравнение полученных оценок $\delta^{18}\text{O}(\text{ПК})$ с сезонными вариациями величин $\delta^{18}\text{O}$ и δD в речных водах показывает, что водную толщу реки в эстуарной зоне трудно считать гомогенной в отношении изотопных параметров ПК. Очень наглядно это демонстрирует пример вертикального распределения величин $\delta^{18}\text{O}(\text{ПК})$ (и $\delta\text{D}(\text{ПК})$), которые ведут себя аналогично) в пределах Енисейского залива и Обской губы. В эстуарных зонах в составе ПК логично было бы ожидать резкое преобладание вод соответствующей реки, но наши данные показывают, что это не так, и что в пределах эстуариев крупных рек можно обнаружить пресный компонент постороннего, не речного, происхождения, привнесенный со стороны моря. Как нам удалось показать, вся толща вод как в Обской губе, так и в Енисейском заливе оказывается гетерогенной по составу и происхождению пресного компонента. Его распределение и основные пути распространения в зоне перехода река-море на момент исследований (ко-

нец июля) можно представить формальной схемой, приведенной на рис. 9.

В поверхностном слое речного эстуария (менее 5–10 м) пресный компонент формируют преимущественно воды речного стока, возможно, с небольшим участием локальных атмосферных осадков и талого речного льда. Как было установлено, в верхних горизонтах вод как Обской губы, так и Енисейского залива, эти компоненты успевают гомогенизироваться, представляя некие единые характеристики «речного стока». Столь же гомогенным является и пресный компонент, содержащийся в водах, поступающих в зону обоих эстуариев со стороны Карского моря. Этот ПК имеет изотопно-легкие характеристики ($\delta^{18}\text{O} \approx -22... -25\text{‰}$, $\delta\text{D} \approx -160... -190\text{‰}$), сформированные за счет вклада атмосферных осадков высоких широт, а его гомогенность объясняется длительным временем пребывания данного типа ПК в составе вод Карского моря. Опресненные этим компонентом морские воды формируют придонный слой, который постепенно выклинивается по мере удаления от устья залива или губы. Воды, находящиеся между поверхностным и придонным слоями, являются гетерогенными в отношении изотопных характеристик ПК, по-видимому, из-за более интенсивного латерального перемешивания вод в эстуарии по сравнению со скоростью вертикального перемешивания. Разброс величин $\delta^{18}\text{O}(\text{ПК})$ в промежуточном слое достигает 16‰ в Обской губе и около 12‰ в Енисейском заливе, что находится за пределами погрешности любых оценок для речных вод, включая учет сезонных вариаций. Столь сильные изменения, вероятно, связаны не только со смешением изотопно-легкого «карскоморского»

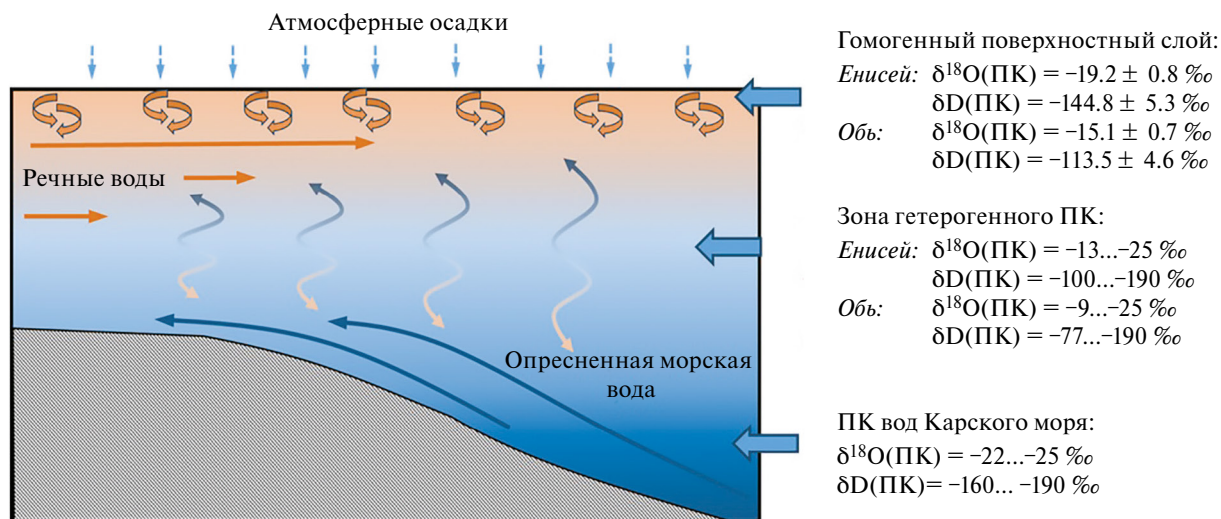


Рис. 9. Характеристика пресных компонентов в зоне перехода река-море на примере Обской губы и Енисейского залива в конце июля 2016 г.

ПК и речных вод, но и с присутствием дополнительных компонентов, например, талого речного льда в Обской губе или залива вод, опресненных в Обской губе в северную часть Енисейского залива.

Благодарности. Авторы глубоко признательны научному руководителю рейса академику РАН М.В. Флинту и благодарят за помощь в сборе образцов Г.И. Надъярных и команду гидрофизиков под руководством С.А. Шуки за предоставленные гидрофизические данные.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН, тема ФММН-2024-0021 124022400138-5, изотопный анализ водорода и интерпретация полученных данных проведена при поддержке гранта РНФ № 23-17-00001.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брезгунов В.С., Дебольский В.К., Мордасов М.А. и др. Изучение условий формирования солёности вод в устьевых участках арктических морей с помощью природных стабильных изотопов кислорода // Водные ресурсы. 1980. № 2. С. 101–105.
2. Дубинина Е.О., Коссова С.А., Мирошников А.Ю. Источники и механизмы опреснения морских вод в заливах Цивольки и Седова (Новая Земля) по изотопным (δD , $\delta^{18}O$) данным // Океанология. 2019. Т. 59. № 6. С. 928–938.
3. Дубинина Е.О., Коссова С.А., Мирошников А.Ю. и др. Изотопная (δD , $\delta^{18}O$) систематика вод морей Арктического сектора России // Геохимия. 2017. № 11. С. 1041–1052.
4. Дубинина Е.О., Коссова С.А., Мирошников А.Ю. и др. Изотопные (δD , $\delta^{18}O$) параметры и источники опресненных вод Карского моря // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 38–48.
5. Дубинина Е.О., Мирошников А.Ю., Коссова С.А. и др. Модификация опресненных вод на шельфе моря Лаптевых: связь изотопных параметров и солёности // Геохимия. 2019. Т. 64. № 1. С. 3–19.
6. Коссова С.А., Дубинина Е.О., Мирошников А.Ю. и др. Применение дейтериевого эксцесса для идентификации источников опреснения в заливах архипелага Новая Земля // Доклады Академии Наук. 2019. Т. 487. № 2. С. 212–216.
7. Alkire M.B., Morison J., Andersen R. Variability in the meteoric water, sea-ice melt, and Pacific water contributions to the central Arctic Ocean, 2000–2014 // J. Geophys. Res. Oceans. 2015. V. 120. P. 1573–1598. <https://doi.org/10.1002/2014JC010023>
8. Bauch D., Erlenkeuser H., Andersen N. Water mass processes on Arctic shelves as revealed from $\delta^{18}O$ of H_2O // Global and Planetary Change. 2005. V. 48. P. 165–174.
9. Bauch D., Erlenkeuser H., Stanovoy V. et al. Freshwater distribution and brine waters in the southern Kara Sea in summer 1999 as depicted by $\delta^{18}O$ results // In: Stein R. et al. (Eds.) Siberian river run-off in the Kara sea. Elsevier Science, 2003. P. 73–90.
10. Brezgunov V.S., Debolskii V.K., Nechaev V.V. et al. Characteristics of the formation and salinity upon mixing of sea and river waters in the Barentz and Kara Seas // Water Resources. 1983. V. 9. № 4. P. 335–344.
11. Cooper L.W., McClelland J.W., Holmes R.M. Flow-weighted values of runoff tracers ($\delta^{18}O$, DOC, Ba, alkalinity) from the six largest Arctic rivers // Geophysical Research Letters. 2008. V. 35. L18606. <https://doi.org/10.1029/2008GL035007>
12. Craig H., Gordon I.I. Deuterium and oxygen 18 variations in the ocean and the marine atmosphere // In: Tongiorgi E. (Ed.) Stable isotopes in oceanographic studies and Paleotemperatures. Spoleto, 1965.
13. Feng D., Gleason C.J., Lin P. et al. Recent changes to Arctic river discharge // Nature Communications. 2021. V. 12. P. 6917.
14. Frew R.D., Dennis P.F., Heywood K.J. et al. The oxygen isotope composition of water masses in the northern North Atlantic // Deep-sea Res. 2000. V. 47. P. 2265–2286.
15. Gordeev V.V., Martin J.M., Sidorov I.S. et al. A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean // Am. J. Sci. 1996. V. 296. P. 664–691.
16. Holmes R.M., Coe M.T., Fiske G.J. et al. Climate Change Impacts on the Hydrology and Biogeochemistry of Arctic Rivers // In: Climatic Change and Global Warming of Inland Waters. John Wiley & Sons, 2012. <https://doi.org/10.1002/9781118470596.ch1>
17. Kazakova U., Polukhin A., Shabanov P. Origin and evolution of the surface desalinated layer of the Kara Sea during the ice-free period // Journal of Marine Systems. 2024. V. 243. P. 103950.
18. Kirchner J.W., Allen S.T. Seasonal partitioning of precipitation between streamflow and evapotranspiration, inferred from end-member splitting analysis // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2020. V. 24. P. 17–39. <https://doi.org/10.5194/hess-24-17-2020>
19. Lehman M., Siegenthaler U. Equilibrium oxygen and hydrogen isotope fractionation between ice and water // Journal of Glaciology. 1991. V. 37. № 125. P. 23–26.
20. McClelland J.W., Tank S.E., Spencer R.G.M. et al. Arctic Great Rivers Observatory // Water Quality Dataset, Version 20231403. 2023. <https://www.arcticgreatrivers.org/data>
21. McClimans T.A., Johnson D.R., Krosshavn M. et al. Transport processes in the Kara Sea // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. № C6. P. 14, 121–14, 139. <https://doi.org/10.1029/1999JC000012>

22. *Melling H., Moore R.* Modification of halocline source waters during freezing on the Beauford Sea shelf: Evidence from oxygen isotopes and dissolved nutrients // *Cont. Shelf Res.* 1995. V. 15. P. 89–113.
23. *Nummelin A., Ilicak M., Li C. et al.* Consequences of future increased Arctic runoff on Arctic Ocean stratification, circulation, and sea ice cover // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2016. V. 9. P. 18642.
24. *Osadchiev A., Kuskova E., Ivanov V.* The roles of river discharge and sea ice melting in formation of freshened surface layers in the Kara, Laptev, and East Siberian seas // *Front. Mar. Sci.* 2024. V. 11. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1348450>
25. *Osadchiev A.A., Assadulin En.E., Miroshnikov A. Yu. et al.* Bottom Sediments Reveal Inter-Annual Variability of Interaction between the Ob and Yenisei Plumes in the Kara Sea // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. P. 18642.
26. *Osadchiev A.A., Izhitsky A.S., Zavialov P.O. et al.* Structure of the buoyant plume formed by Ob and Yenisei river discharge in the southern part of the Kara Sea during summer and autumn // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2017. V. 122. P. 5916–5935.
27. *Ostlund H.G., Hut G.* Arctic Ocean Water Mass Balance From Isotope Data // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89. P. 6373–6381.
28. *Panteleev G., Proshutinsk A., Kulakov M. et al.* Investigation of the summer Kara Sea circulation employing a variational data assimilation technique // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. C04S15. <https://doi.org/10.1029/2006JC003728>
29. *Pavlov V.K., Pfirman S.L.* Hydrographic structure and variability of the Kara Sea: Implications for pollutant distribution // *Deep-Sea Research.* 1995. V. 42. № 6. P. 1369–1390.
30. *Yamamoto-Kawai M., McLaughlin F.A., Carmack E.C. et al.* Surface freshening of the Canada Basin, 2003–2007: River runoff versus sea ice meltwater // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. C00A05.
31. *Yang J., Dudley B.D., Montgomery K. et al.* Characterizing spatial and temporal variation in ^{18}O and ^2H content of New Zealand river water for better understanding of hydrologic processes // *Hydrol. Process.* 2020. <https://doi.org/10.1002/hyp.13962>

ORIGIN OF FRESHWATER COMPONENT IN ESTUARIES OF THE OB AND YENISEI RIVERS AND WATERS OF KARA SEA ADJACENT ZONES BASED ON ISOTOPIC (δD , $\delta^{18}\text{O}$) DATA

S. A. Kossova*, E. O. Dubinina

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

* e-mail: sonch_1@rambler.ru

Methods of estimation the isotopic parameters (δD , $\delta^{18}\text{O}$) of the freshwater component in the river-sea transition zone are considered in this work. This research is based on samples collected at the end of the summer season along two meridional sections laying from the estuaries of the Ob and Yenisei rivers to the center of the Kara Sea. The runoff of these rivers has contrasting isotopic parameters contrasting ($\delta^{18}\text{O} = -15.0 \pm 0.3\text{‰}$, $\delta\text{D} = -112.7 \pm 2.1\text{‰}$ for the Ob and $\delta^{18}\text{O} = -18.9 \pm 0.6\text{‰}$, $\delta\text{D} = -142.2 \pm 4.3\text{‰}$ for the Yenisei). It has been established that river waters located within the surface layer of sea water do not have time to homogenize: in the center of the Ob-Yenisei plume, the part of Ob waters is 60%. Within river estuaries, FC is homogeneous only in the upper layer of water (less than 5 m); with depth, variations in $\delta^{18}\text{O}(\text{FC})$ values reach 16‰ for the Ob Bay and 12‰ for the Yenisei Bay, exceeding the annual course of seasonal variations of this value in river water. In the bottom layer for the estuarine zones of both rivers, the presence of a total FC with light isotopic characteristics corresponding to regional atmospheric precipitation is observed, that FC is supplied to the estuary zone with the waters of the Kara Sea.

Key words: oxygen and hydrogen isotopes, river runoff, the Kara Sea, fresh component