

УДК 551.465

## ИСТОЧНИКИ И МЕХАНИЗМЫ ОПРЕСНЕНИЯ МОРСКИХ ВОД В ЗАЛИВАХ ЦИВОЛЬКИ И СЕДОВА (НОВАЯ ЗЕМЛЯ) ПО ИЗОТОПНЫМ ( $\delta D$ , $\delta^{18}O$ ) ДАННЫМ

© 2019 г. Е. О. Дубинина\*, С. А. Коссова, А. Ю. Мирошников

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия*  
\*e-mail: elenadelta@gmail.com

Поступила в редакцию 25.04.2019 г.

После доработки 04.06.2019 г.

Принята к публикации 18.06.2019 г.

Трехлетние (2014–2016 гг.) наблюдения изотопных ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) параметров вод заливов Седова и Цивольки (Новая Земля), опресненных водами разного происхождения (континентальный речной сток, атмосферные осадки, воды, поступающие с архипелага), показали, что степень опреснения и источники опресняющих компонентов различны для вод, залегающих на разных глубинах. Вариации величин  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  затрагивают только воды верхнего слоя, который содержит до 30% пресного компонента. В 2015 г. в поверхностных водах залива Седова присутствовали воды р. Оби, в водах залива Цивольки преобладали воды, поступившие с Новой Земли. Глубинные воды в обоих заливах имеют признаки опреснения атмосферными осадками высоких широт. Перенос данных вод в район ЮВ побережья Новой Земли мог происходить через желоба Святой Анны и Воронина. Различие механизмов опреснения вод заливов Седова и Цивольки определяется разной морфологией дна и разной степенью свободного обмена с водами Карского моря.

**Ключевые слова:** изотопы кислорода и водорода, заливы Новой Земли, опреснение вод, Карское море, континентальный сток

**DOI:** 10.31857/S0030-1574596928-938

### ВВЕДЕНИЕ

Карское море, ограниченное с северо-запада архипелагом Новая Земля, является наиболее опресненным водоемом по сравнению с другими арктическими морями России. По самым ранним оценкам, до 40% поверхностных вод Карского моря считается затронутыми процессами опреснения [24]. Кроме общего для Арктического региона компонента, представленного атмосферными осадками, глобальным источником пресных вод в Карском море является сток двух крупных рек — Оби и Енисея, поставляющих более 1.5 тыс. км<sup>3</sup> пресной воды ежегодно [18]. Резкий сезонный выброс речной воды приводит к появлению пресноводных плюмов на поверхности Карского моря. Многочисленными исследованиями, в том числе с применением изотопных методов, было установлено, что речные воды распространяются преимущественно в верхнем слое морских вод — не глубже 5–15 м [1, 2, 9]. В распространении речных вод в акватории Карского моря ключевую роль играет ветровой перенос, который имеет устойчивые

направления и может переносить опресненные воды на дальние расстояния, в том числе к юго-восточному берегу Новой Земли [3]. Однако идентифицировать речные воды в прибрежных зонах архипелага сложно, поскольку тут присутствуют пресные воды локального происхождения — мелкие сезонные водотоки и талая вода ледников.

Цель настоящей работы состоит в оценке роли разных источников опреснения в заливах юго-восточного побережья Новой Земли — глобальных и локальных с применением методов изотопной геохимии кислорода и водорода, отражающих историю формирования и происхождение природных вод [15, 13, 8, 23, 25]. Заливы Седова и Цивольки расположены недалеко друг от друга на восточном побережье Новой Земли, но различаются по глубине, морфологии дна и степени открытости по отношению к акватории Карского моря. Материал для исследований отбирался в течение трех лет (2014–2016 гг.), что обеспечило возможность оценить насколько стабильны изотопные параметры источников

опреснения во времени и насколько активно они участвуют в опреснении акваторий изученных заливов.

Ранее было установлено, что в центральной части Карского моря наблюдается двухкомпонентное смешение модифицированных атлантических вод, поступающих из Баренцева моря с эстуарными водами Енисея и Оби [1, 2]. Однако с удалением от источников континентального стока в процессы опреснения подключается сток с архипелага, что приводит к отклонению изотопных параметров и солёности от модели простого двухкомпонентного смешения [2, 4]. Несмотря на высокую изученность изотопных параметров вод Карского моря [1, 2, 12], специальных изотопных исследований в акваториях заливов архипелага Новая Земля, ранее не проводилось.

### ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАЛИВОВ

Положение станций в заливах и места отбора локальных пресных вод показаны на рис. 1. Заливы Цивольки и Седова расположены на юго-восточном берегу Северного острова архипелага Новая Земля, в 45 км друг от друга. Залив Цивольки удален от залива Седова на юго-запад. Он вдаётся внутрь Северного острова на 30 км в СЗ направлении до фронтальной части выводного ледника Серп и Молот (рис. 1а). Здесь ширина залива составляет 3–3,5 км, а глубина в центральной части фронта — 60–70 м. На расстоянии 0,5–0,8 км от фронта ледника на глубинах от 8–10 до 20 м находится конечная морена, вытянутая поперек залива в ЮЗ-СВ направлении.

С удалением от фронта ледника на ЮВ глубины залива возрастают до 150 м и более. Следующее повышение в рельефе дна находится примерно в 4 км от фронта ледника, где глубина составляет около 80 м. Чуть дальше располагаются острова Горбатый и Безымянный, после которых глубина вновь увеличивается примерно до 140 м. На выходе из залива находится еще одно возвышение, которое контролируется островами Курган, Цивольки и Круглый.

Залив Седова вдаётся в берег Северного острова на расстояние около 20 км и напоминает по форме воронку с несколько искривленной узкой частью (рис. 1б). На входе ширина залива составляет около 10 км, а глубина — 145 м. В центральной части ширина залива уменьшается до 1,5 км при глубине менее 100 м. Остальная часть залива протягивается на 9 км в виде узкого фьорда шириной 0,6–1 км и глубиной 50–60 м.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материал для исследований был отобран во время рейсов научно-исследовательских судов «Профессор Штокман» (2014 г.) и «Академик Мстислав Келдыш» (2015, 2016 гг.) в район Карского моря. Воды залива Цивольки отбирались во всех трех экспедициях, воды залива Седова — в двух последних. Кроме вод заливов были опробованы воды локальных водотоков и ледник Серп и Молот в заливе Цивольки. В экспедиции 2015 г. были взяты пробы вод из желобов Св. Анны и Воронина. Все пробы, кроме водотоков и ледника, отбирались с использованием батометров комплекса SBE 32 при гидрофизическом зондирова-

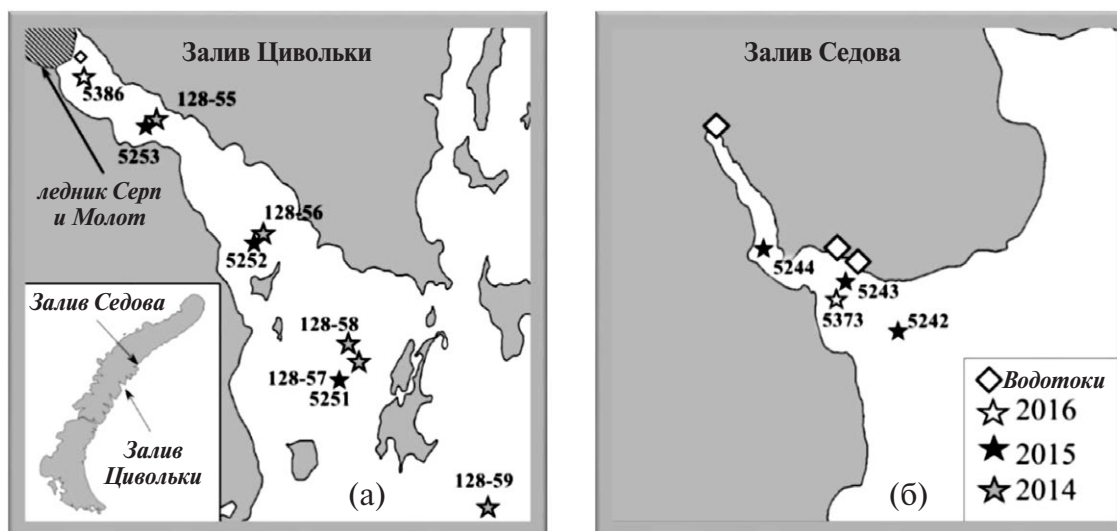


Рис. 1. Расположение станций в заливах Новой Земли.

нии. Для каждой станции изучался вертикальный профиль распределения температуры, солености и величин  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$ .

Изотопный анализ кислорода проведен на приборном комплексе DELTA V+ (Thermo, Германия) с использованием опции GasBench II в режиме постоянного потока гелия. Изотопный анализ водорода проведен методом разложения на металлическом хrome (опция H/Device) и измерением в режиме двойного напуска на масс-спектрометре DELTAplus (Thermo, Германия). Все величины  $\delta^{18}O$  и  $\delta D$  калиброваны в шкале V-SMOW–V-SLAP и определены с точностью  $\pm 0.05$  и  $\pm 0.3\text{‰}$  соответственно.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Изотопные характеристики всех потенциальных источников опреснения заливов Новой Земли суммированы в табл. 1. Образцы локальных водотоков отбирались как в береговой зоне заливов, так и на поверхности воды. По своим изотопным параметрам ( $\delta D$  и  $\delta^{18}O$ ) локальные воды варьируют слабо — в области значений  $-110$  и  $-15\text{‰}$  соответственно. Величины  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  льда ледника Серп и Молот варьируют в более широких пределах — от  $-113.4$  до  $-125.5\text{‰}$  и от  $-15.7$  до  $-17.7\text{‰}$  соответственно для 22 образцов. Эти диапазоны аналогичны опубликованным ранее данным (от  $-113$  до  $-129.5\text{‰}$  и от  $-15.5$  до  $-17.8\text{‰}$  [5]).

Усредненные величины  $\delta^{18}O$  и  $\delta D$  речного стока Оби ( $-15.5$ ;  $-115.8\text{‰}$ ), Енисея ( $-19.3$ ;  $-145.3\text{‰}$ )

и регионального атмосферного компонента ( $-23$ ;  $-173\text{‰}$ ) приняты согласно опубликованным данным [1, 17]. Эти данные дополнены собственными результатами для изотопного состава водорода эстуарных вод Оби.

Представленные в табл. 1 данные для пресных водотоков, отобранных в обоих заливах, близки к составу ледникового льда Серп и Молот. Из приведенных в таблице данных следует, что эстуарные воды р. Оби по своим изотопным характеристикам неотличимы от вод, поступающих с Новой Земли. Эстуарные воды Енисея и атмосферные осадки региона, напротив, обладают существенно более легким изотопным составом водорода и кислорода (табл. 1), что позволяет их различить на фоне остальных пресных компонентов.

**Воды заливов.** Для вод всех изученных станций наблюдается схожая динамика распределения величин  $\delta D$ , которые возрастают с глубиной (рис. 2). Аналогично ведут себя величины  $\delta^{18}O$  и соленость. Однако вариации данных параметров наблюдаются только выше галоклина, в более глубоких водах межгодовых вариаций изотопных параметров не установлено. На рис. 2 видно, что наиболее легкий изотопный состав водорода наблюдался в поверхностных водах заливов в 2015 г., когда происходило падение их солености до 24. На диаграмме  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  точки вод обоих заливов отклоняются от идеальной линии двухкомпонентного смешения и показывают разброс как в области наименьшего, так и в области наибольшего опреснения (поля I и II на рис. 3).

**Таблица 1.** Систематика изотопных параметров потенциальных источников опреснения вод в заливах юго-восточного побережья Новой Земли

Тип пресных вод	$\delta^{18}O, \text{‰}$	$\delta D, \text{‰}$	$d$
Снег высоких широт [21]	$-24...-25$	$\approx -200$	
Атмосферные осадки региона [17, 2]	$-23.0$	$-173.0$	11.0
Эстуарные воды Оби [2, данная работа]	$-15.5$	$-115.8$	8.3
Эстуарные воды Енисея [2]	$-19.3$	$-145.3$	9.2
Водотоки в заливе Цивольки [данная работа]	$-15.6$	$-111.5$	13.3
	$-16.5$	$-118.2$	13.8
	$-15.4$	$-112.8$	10.4
Водотоки в заливе Седова [данная работа]	$-12.7$	$-97.1$	4.6
	$-16.1$	$-116.3$	12.5
	$-16.0$	$-114.6$	13.7
	$-15.6$	$-112.2$	13.0
	$-14.6$	$-105.2$	11.6
Ледник Серп и Молот [данная работа]	от $-17.6$ до $-15.7$	от $-125.5$ до $-113.4$	от 10.8 до 18.2

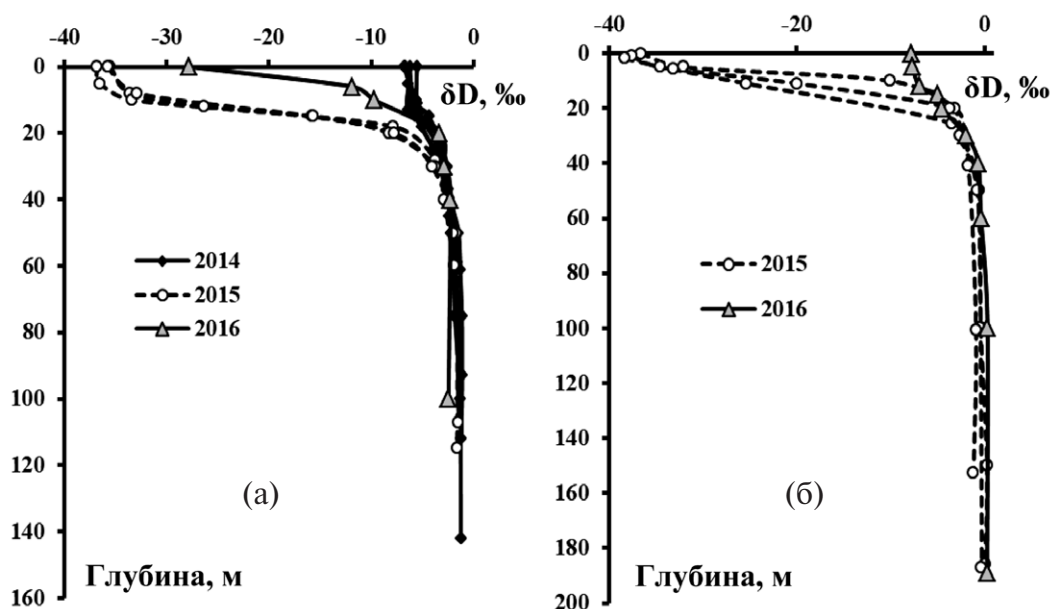


Рис. 2. Вертикальное распределение изотопного состава водорода воды в заливах Цивольки (а) и Седова (б) в разные годы.

Не наблюдается четкой линейной связи для вод заливов и на диаграммах «изотопный состав–соленость» (рис. 4 и 5), что указывает на сложный механизм опреснения этих вод.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Процессы опреснения традиционно рассматриваются в координатах «изотопный состав–соленость», и обычно в качестве изотопного параметра используют величину  $\delta^{18}\text{O}$  [11, 23]. В данной работе связь изотопного состава с соленостью рассматривается в координатах  $S$ - $\delta\text{D}$  (рис. 4 и 5), полностью аналогичных координатам

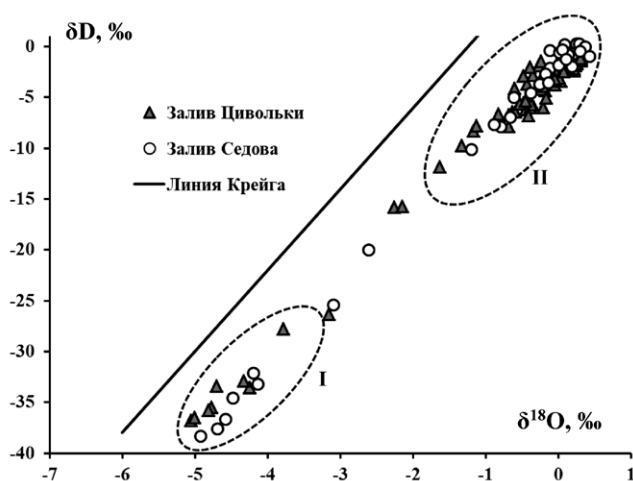


Рис. 3. Изотопный состав кислорода и водорода вод заливов Новой Земли: I — воды галоклина; II — воды, расположенные ниже галоклина.

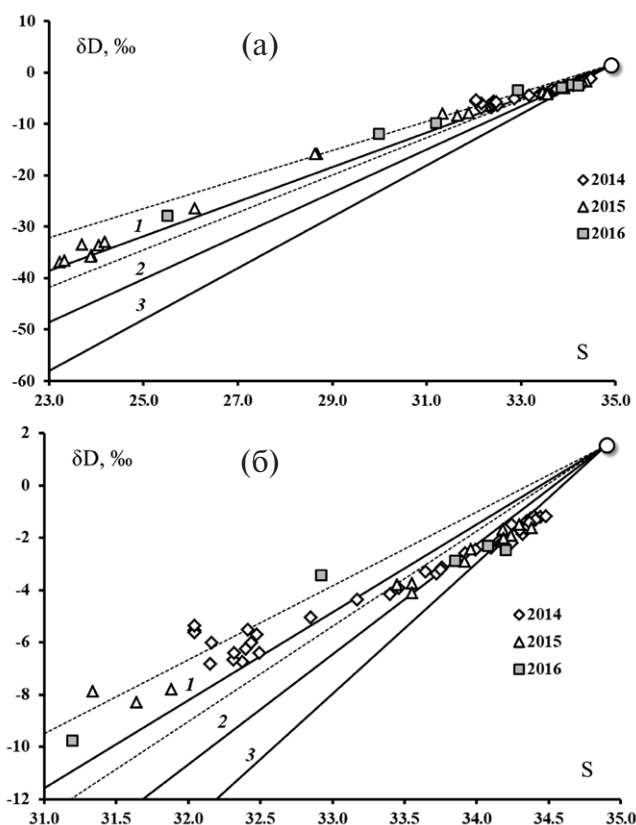


Рис. 4. Изотопный состав водорода и соленость вод залива Цивольки: (а) — все воды, отобранные в 2014–2016 гг.; (б) — слабоопресненные воды ( $S > 31$ ). Линии 1, 2, 3 — смешение морского компонента атлантического происхождения с водами Оби, Енисея и региональных атмосферных осадков соответственно. Пунктиром ограничена область составов, характерных для двухкомпонентного смешения с водами, поступающими с архипелага Новая Земля.

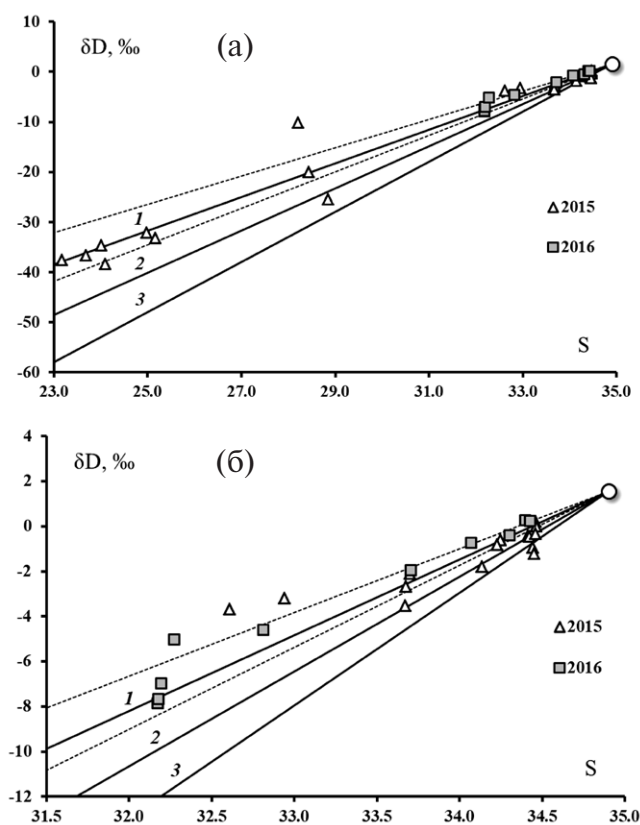


Рис. 5. Изотопный состав водорода и соленость вод залива Седова: (а) — все воды, отобранные в 2015–2016 гг.; (б) — слабоопресненные воды ( $S > 31$ ). Обозначения см. на рис. 4.

натам  $S$ - $\delta^{18}\text{O}$ . Для рассмотрения изотопных характеристик вод, опресненных несколькими типами пресных компонентов, мы предлагаем подход, при котором наблюдаемые составы сравниваются с реперными линиями, отвечающими двухкомпонентному смешению всех потенциальных источников опреснения с одним «морским» компонентом. На диаграммы  $S$ - $\delta D$  рисунков 4 и 5 нанесены линии, отвечающие смешению атлантических вод, доминирующих в Карском море, с пресными компонентами,

систематизированными в табл. 1. Полученные данные для вод заливов рассмотрены относительно этих опорных линий двухкомпонентного смешения.

Изотопные параметры потенциальных источников опреснения заливов Новой Земли значительно варьируют (табл. 1), что приводит к очевидному несоответствию измеренных характеристик линиям двухкомпонентного смешения. Обычно в качестве причины разброса данных в координатах  $S$ - $\delta D$  рассматривается модификация вод при формировании льда. Несмотря на то, что формирование льда является атрибутом заливов Новой Земли, этот процесс, по-видимому, имеет подчиненное значение, поскольку при модификации вод должен возникать разброс данных в области высокой солености. В случае заливов Седова и Цивольки разброс данных, напротив, возрастает в области низкой солености. Более того, воды, расположенные под галоклином в двух разных заливах, различных по степени открытости, глубинам и рельефу дна, идентичны по солености (рис. 6), что свидетельствует не в пользу их модификации, которая, как правило, проявляется локально. Эпизодические точки, расположенные выше всех линий двухкомпонентного смешения на диаграммах рисунков 4 и 5, могут рассматриваться как результат присутствия в пробе талого морского льда.

**Опреснение вод в заливе Цивольки.** На диаграмме « $S$ - $\delta D$ » (рис. 4а) все данные наблюдений расположены в пределах единой последовательности, что указывает на постоянство изотопных параметров основных источников опреснения залива во времени. Максимально опресненные воды залива Цивольки ( $S \approx 24$ – $30$ ), отобранные в 2015–2016 гг., находятся в верхних горизонтах (0–6 м на станции 5386 и 0–15 м на станциях 5251, 5252 и 5253). Они характеризуются низкими величинами  $\delta D$  (от  $-9$  до  $-37\text{‰}$ ) и  $\delta^{18}\text{O}$  (от  $-1.6$  до  $-5.1\text{‰}$ ), а на диаграмме рис. 4а попадают

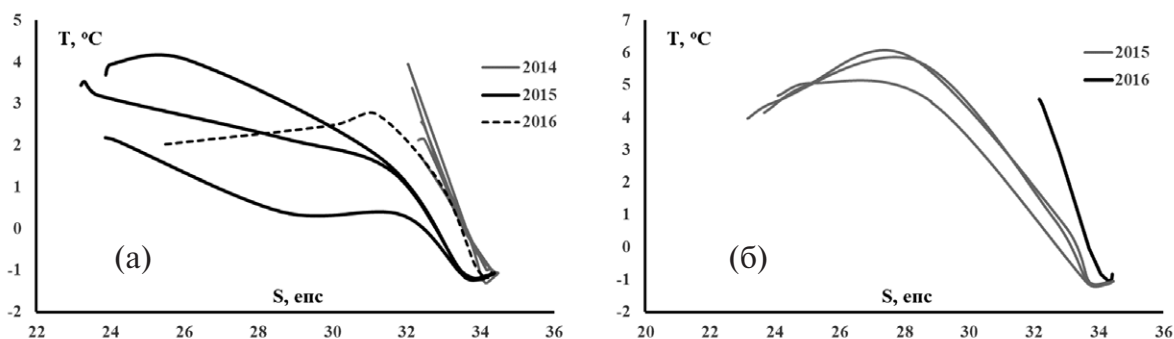


Рис. 6. TS-диаграммы вод заливов Цивольки (а) и Седова (б).

**Таблица 2.** Параметры минимально опресненных вод в заливах Новой Земли

	Глубины	$\delta^{18}\text{O}$ , ‰	$\delta\text{D}$ , ‰	S	T °C
Залив Цивольки, n=9	60–142	$0.25 \pm 0.2$	$-1.3 \pm 0.2$	$34.39 \pm 0.04$	$-1.07 \pm 0.04$
Залив Седова, n=14	40–189	$0.15 \pm 0.2$	от -1.8 до 0.3	$34.35 \pm 0.13$	$-1.03 \pm 0.1$
Атлантические воды		$0.26 \pm 0.1$	$+1.55 \pm 0.4$	$34.95 \pm 0.05$	
Желоб Св. Анны	10–90	$-0.1 \pm 0.1$	от -2.8 до -0.3	$34.35 \pm 0.13$	от -0.6 до 5
Желоб Воронина	30–115	$0.16 \pm 0.2$	от -1.8 до 0.8	$34.24 \pm 0.15$	$-1.02 \pm 0.4$

в ограниченную пунктиром область опреснения тальми водами ледника Серп и Молот и на линию смешения с водами Оби, расположенную в той же области. Воды с соленостью ниже 25 лежат непосредственно на линии смешения с водами Оби или локального стока с архипелага. Точнее установить опресняющий компонент нельзя, поскольку изотопные параметры данных пресных вод близки друг к другу (табл. 1).

Под галоклином, на глубинах 40–142 м, в заливе Цивольки расположены минимально опресненные воды ( $S > 34$ ). На диаграмме «S- $\delta\text{D}$ » (рис. 4б) они располагаются вдоль линии двухкомпонентного смешения с региональным атмосферным компонентом, хотя и не соответствуют ей полностью. Эти воды в течение трех лет имели устойчивые характеристики: соленость, температуру и изотопный состав водорода и кислорода (табл. 2). По сравнению с баренцевоморскими водами атлантического происхождения (табл. 2), соленость этих вод понижена до  $\approx 34.5$ , что предполагает присутствие около 1.3–1.5% пресного компонента. Согласно материальному балансу, этот компонент должен иметь величину  $\delta\text{D} < -200\text{‰}$ . Оценить таким же образом величину  $\delta^{18}\text{O}$  данного компонента сложно, поскольку балансовый расчет дает большую ошибку для величин  $\delta^{18}\text{O}$ , близких к нулю. Если предположить, что опресняющий компонент имеет атмосферное происхождение (т.е. представлен осадками), то его величина  $\delta^{18}\text{O}$  может быть рассчитана из уравнения Крейга [14], переписанного в следующем виде:

$$\delta^{18}\text{O} = (\delta\text{D} - 10) / 8.$$

Расчет по этому уравнению для величины  $\delta\text{D} \approx -200\text{‰}$  дает величину  $\delta^{18}\text{O} \approx -24\text{‰}$ .

Воды залива Цивольки, расположенные на промежуточных глубинах (20–40 м), имеют промежуточную соленость ( $33 < S < 34$ ) и формируют на диаграмме рис. 4б тренд, занимающий секующее положение по отношению ко всем линиям двухкомпонентного смешения. Положение этого тренда показывает, что в данном интервале глубин происходит смешение резко опреснен-

ных поверхностных вод с минимально опресненными нижележащими водами.

**Опреснение вод в заливе Седова.** Данные для вод залива Седова в координатах « $\delta\text{D}$ -S» ведут себя иначе, чем данные для вод залива Цивольки (рис. 5а). Воды с минимальным опреснением ( $S > 34$ ), залегающие на глубинах 40–189 м, имеют температуру и изотопный состав кислорода близкие к аналогичным в минимально опресненных водах залива Цивольки. Однако, в отличие от залива Цивольки, для этих вод характерны существенные вариации в изотопном составе водорода. Например, максимально «солёные» воды ( $S \approx 34.5$ ) на диаграмме «S- $\delta\text{D}$ » (рис. 5б) формируют вертикальный разброс величин  $\delta\text{D}$  от -1.8 до 0.3‰, что в несколько раз превышает величину аналитической ошибки ( $\pm 0.3\text{‰}$ ). Постоянные гидрофизические характеристики — температура и соленость — указывают на единую водную массу, занимающую глубины ниже 40 м в обоих заливах. Однако существенные вариации изотопного состава водорода указывают на участие как минимум двух разных компонентов в формировании минимально опресненных вод в заливе Седова. Согласно балансовому расчету, данные компоненты были опреснены водами двух типов — с величиной  $\delta\text{D}$  ниже -200‰ и с величиной  $\delta\text{D}$  около -100‰, чтобы сформировать наблюдаемый вертикальный разброс в области  $S \approx 34.5$ . Один из этих компонентов аналогичен опресняющему компоненту глубинных вод залива Цивольки, а второй обладает изотопным составом водорода, близким к составу локальных источников опреснения и эстуарной воды Оби.

В области умеренной и низкой солености для залива Седова прослеживаются те же закономерности, что и в минимально опресненных водах — здесь наблюдается изопикническое смешение двух водных масс, опресненных компонентами с контрастными изотопными параметрами. Смешение происходит в разных областях солености, в результате чего на диаграмме  $\delta\text{D}$ -S наблюдаются вертикальный разброс точек. Последний яркий эпизод смешения наблюда-

ется в области  $S \approx 28$ , где смешивающиеся воды наиболее контрастны по своим изотопным параметрам (рис. 5а). Эти воды отобраны на глубинах 10–11 м на трех разных станциях (станции 5242–5244). При близкой солености они имеют близкую температуру ( $\approx 5^\circ\text{C}$ ), т.е. однородны по плотности, что, по-видимому, обуславливает их изопикническое смешение. Распределение изотопных параметров вод в заливе Седова в 2015 г. предполагает не только сильное опреснение, но и резкие вариации в изотопном составе опресняющих компонентов. Максимально опресненные воды, отобранные с малых глубин (0–6 м), показали падение солености до 24, что соответствует вкладу 28–33% пресного компонента. Точки, соответствующие максимально опресненным водам поверхностного слоя расположены на диаграмме  $\delta D$ - $S$  на линии двухкомпонентного смешения либо с водами реки Оби, либо с локальным компонентом.

**Источники и механизмы опреснения вод заливов Цивольки и Седова.** Полученные данные показывают, что воды обоих заливов на всех глубинах и во все годы наблюдений опреснены по отношению к баренцевоморским водам атлантического происхождения, господствующим в Карском море. Однако степень опреснения и источники опресняющих компонентов различны для вод, залегающих на разных глубинах. В табл. 3 суммированы оценки общего вклада пресных вод на разных глубинах в разные годы наблюдения. Расчеты вклада пресных вод были проведены исходя из механизма смешения вод поверхностного слоя с водами, ниже галоклина. То есть в качестве «морского» компонента были использованы параметры вод, расположенных ниже галоклина в соответствующем заливе. В свою очередь, для этих глубинных вод в качестве «морского» компонента использовались параметры вод атлан-

тического происхождения, доминирующих в Баренцевом и Карском морях.

Минимально опресненные глубинные воды в обоих заливах близки не только по физическим (соленость, температура), но и по изотопным параметрам (табл. 2). Они содержат около 1–2% пресного компонента с величинами  $\delta D$  и  $\delta^{18}\text{O}$  более низкими, чем усредненные величины  $\delta D$  и  $\delta^{18}\text{O}$  регионального атмосферного компонента ( $-173$  и  $-23\text{‰}$  соответственно), установленные для 76–78 градусов северной широты [2, 17]. Снег с величинами  $\delta D$  около  $-200\text{‰}$  и величинами  $\delta^{18}\text{O}$  около  $-25\text{‰}$  и ниже эпизодически наблюдались в районе Шпицбергена и Земли Франца Иосифа [21]. Более устойчивы атмосферные осадки с такими изотопными характеристиками в районе Северного Полюса: например, снег с величинами  $\delta D < -200\text{‰}$  был отобран в экспедициях «Барнео-2013» и «Барнео-2014» [6]. В основном, согласно данным станций наблюдения МАГАТЭ [21], в Арктике атмосферные осадки с низкими величинами  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta D$  характерны для северо-западных территорий Канады и Гренландии, но не для района Новой Земли и Карского моря. Об этом также свидетельствуют изотопные параметры ледника Серп и Молот, отложения которого сами по себе являются накопленными многолетними атмосферными осадками (данная работа, [5]). Следовательно, изотопно-легкий компонент атмосферных осадков более высоких широт должен быть привнесен в заливы Новой Земли водами, поступающими из Северного Ледовитого океана. Наиболее вероятный путь поступления таких вод пролегает через северо-восточную часть Карского моря, где расположены желоба Святой Анны и Воронина [16]. На рис. 7 проведено сопоставление минимально опресненных вод изученных заливов с водами, отобранными в районе желобов Св. Анны и Воронина, имеющими тот же ин-

**Таблица 3.** Оценка вклада опресняющих вод (%) в заливах Седова и Цивольки

Год отбора	Поверхностные воды (0–15 м)	Воды переходной зоны (15–40 м)	Воды под галоклином (40 м–дно)
Залив Цивольки			
2014	3.8–7.1	1.4–4.7	1.2–2.3
2015	16.9–32.7	2.7–9.1	1.5–2.1
2016	9.5–26.1	1.8–4.5	2.0–2.4
Залив Седова			
2015	16.3–32.8	2.2–5.4	1.3–2.2
2016	6.3–6.6	4.8–6.3	1.4–2.4

тервал солёности ( $34.5 > S > 34$ ). В районе желоба Св. Анны воды с данной солёностью занимают глубины 10–90 м, в районе желоба Воронина — 30–115 м. Близость изотопных параметров минимально опреснённых вод в заливах к изотопным параметрам вод, находящихся на средних глубинах в районе желобов Св. Анны и Воронина согласуется с описанием гидрологического режима Карского моря, в котором отмечается, что воды Арктического Океана могут поступать в Карское море через указанные желоба [7].

Вертикальное распределение опресняющего компонента, представленного полярными атмосферными осадками, различается между двумя заливами (рис. 8). Для залива Цивольки его присутствие отчетливо выражено: начиная с глубин 50 м, рассчитанные величины  $\delta D$  принимают значения, устойчиво выходящие за пределы, установленные для региональных атмосферных осадков на  $76\text{--}78^\circ$  с.ш. В диапазоне глубин от 50 м до дна (около 150 м) рассчитанные величины  $\delta D$  опресняющего компонента находятся в интервале около  $-190 \dots -200\text{‰}$ .

Для залива Седова присутствие изотопно-легкого опресняющего компонента отмечается в двух образцах на глубинах 100–150 м. Остальные рассчитанные составы указывают на вовлечение пресных вод с изотопными параметрами речного континентального стока и локального стока с архипелага Новая Земля. Таким образом, в заливе Седова наблюдается активное перемешивание вод, поступающих через желоба Святой Анны и Воронина с водами, опреснёнными в пределах Карского моря либо непосредственно у берегов архипелага. Такого смещения не наблюдается в заливе Цивольки, где воды, расположенные ниже галоклина не показывают признаков смешения с опреснёнными *in situ* придонными водами Карского моря. Данный вывод согласуется с разной морфологией донной поверхности заливов. Если в заливе Цивольки присутствует несколько поперечных поднятий дна и гряды островов, препятствующие свободному водному обмену с Карским морем, то в заливе Седова таких преград нет, за исключением неяркой седловины в центральной части с перепадом глубин около 25 м.

Потенциальными источниками пресных вод в водах галоклина обоих заливов могут являться как воды локального стока с Новой Земли, так и эстуарные воды Оби и Енисея. Как уже указывалось, максимальное содержание пресных вод может превышать 30% в поверхностных водах заливов, что близко к оценкам содержания речных

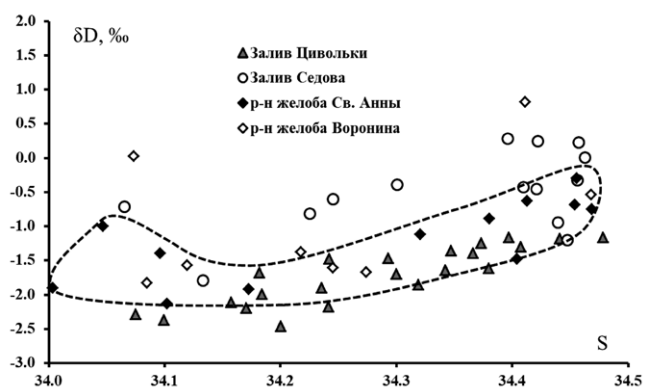


Рис. 7. Минимально опреснённые воды заливов Новой Земли и воды, отобранные в районе желобов Св. Анны и Воронина (основная их часть ограничена пунктиром).

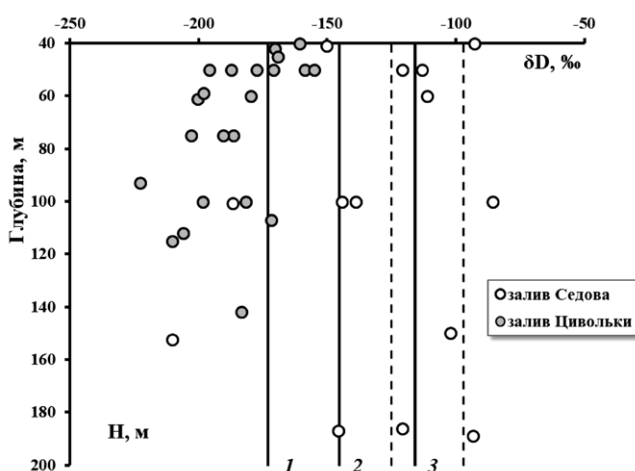


Рис. 8. Изотопный состав водорода компонента, опресняющего воды заливов Цивольки и Седова, расположенные ниже галоклина. Вертикальные линии — составы усредненного стока региональных атмосферных осадков (1), Енисея (2) и Оби (3). Пунктиром ограничено поле составов пресных вод, поступающих с архипелага Новая Земля.

вод в поверхностном опреснённом слое, присутствующем в центре Карского моря (до 40%, [1]). Вероятность распространения речного стока до берегов Новой Земли, по-видимому, различна для эстуарных вод Оби и Енисея, поскольку сезонная динамика разгрузки специфична для каждой реки [19]. По данным Росгидромета [26], в 2015 г. суммарный сток Енисея был близок к стоку Оби, превысив его всего на 15%, но при этом около 50% стока Енисея пришлось на май-июнь, а летний сток Оби был равномерным в течение всего теплого периода года (рис. 9). Следовательно, плюмы Обских вод в 2015 году могли распространяться на поверхности Кар-



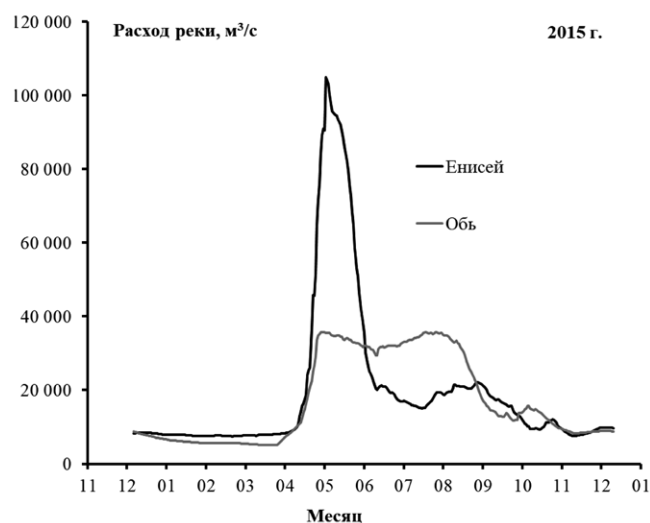


Рис. 9. Динамика стока Енисея и Оби по данным Росгидромета за 2015 г. [26].

Таблица 4. Сезонные вариации изотопных параметров поверхностных и подледных вод Енисея и Оби в 2015 г. по данным проекта ArcticGRO [20]

	$\delta D$	$\delta^{18}O$	$d$
Обь			
январь	-113	-14.9	6.4
март	-144	-19.3	10.1
май	-149	-20.1	11.5
июль	-111	-14.7	6.8
сентябрь	-110	-13.8	0.7
ноябрь	-108	-15.0	11.2
Енисей			
январь	-135	-18.7	14.2
март	-135	-18.5	12.8
май	-135	-18.2	10.5
июль	-137	-18.2	7.9
сентябрь	-128	-17.6	12.4
ноябрь	-132	-18.4	14.6

ского моря в течение более длительного времени, что повышает вероятность их присутствия в заливе Седова в августе–сентябре, когда производился отбор проб. Однако близость изотопных параметров эстуарных вод Оби и водотоков, поступающих с берегов Новой Земли, препятствует идентификации вклада речных вод в поверхностные воды заливов.

Проведенный в данной работе анализ двух изотопных систем молекулы воды (т. е. величин  $\delta^{18}O$  и  $\delta D$ ) позволяет воспользоваться дополни-

тельным параметром — дейтериевым эксцессом,  $d$ , который рассчитывается по уравнению [15]:

$$d = \delta D - 8 \cdot \delta^{18}O.$$

Дейтериевый эксцесс характеризует условия формирования атмосферной влаги, которая является источником всех опресняющих компонентов [10, 22]. Уникальной особенностью атмосферных осадков района Карского моря и Новой Земли является устойчиво высокая величина  $d$ , в среднем около 13–14, эпизодически достигающая 20 и более промилле. Для Оби и Енисея этот параметр варьирует в зависимости от сезона, но в целом он существенно ниже, чем в атмосферных осадках, выпадающих в районе Новой Земли. Например, согласно базе данных проекта ArcticGRO [20], в 2015 году с конца июля по конец сентября величина  $d$  в водах Оби составляла 0.7–6.8‰, а в водах Енисея 7.9–12.4‰ (табл. 4). Заметное различие этих величин позволяет использовать дейтериевый эксцесс для более детальной идентификации источников опреснения вод в заливах Новой Земли.

Необходимо отметить, что расчет дейтериевого эксцесса в опресняющем компоненте имеет смысл только для вод с высокими степенями опреснения, в ином случае расчет может привести к нереальным или ошибочным оценкам  $d$ . Именно поэтому данный расчет проведен нами исключительно для поверхностных вод заливов, на примере 2015 г., когда опреснение вод было максимальным. На рис. 10 приведены рассчитанные величины  $d$  и интервалы дейтериевого эксцесса, соответствующие основным потенциальным источникам опреснения вод заливов Новой Земли. Сравнение величин  $d$ , рассчитанных для опресняющего компонента поверхностных вод залива Седова с этими интервалами, показывает, что он представлен эстуарными водами Оби. С глубиной речной компонент постепенно уступает водам локального стока с архипелага, который отчетливо идентифицируется уже на глубинах 10–12 м.

В поверхностных водах залива Цивольки преобладают воды локальных источников опреснения. Присутствие воды Оби проявлено только в трех пробах, отобранных с глубин 8–12 м. На глубинах 10–15 м среди локальных опресняющих вод начинает доминировать компонент ледникового происхождения, имеющий anomalously высокие величины избытка дейтерия, аналогичные значениям величин  $d$  в отдельных пробах льда ледника Серп и Молот.

Анализ диаграммы, приведенной на рис. 10, позволяет судить о различии в механизме опреснения вод заливов, которое наблюдалось в 2015 г. В залив Седова эстуарные воды Оби, по-видимому, поступили в виде плюма, перенесенного по поверхности моря, при этом воды, опресненные локальным стоком с Новой Земли, заняли подстилающее положение. В заливе Цивольки, несмотря на не менее сильное опреснение, присутствие плюма Обских или Енисейских вод на поверхности не наблюдалось. Эпизодическое появление вод, опресненных континентальным стоком на промежуточных глубинах, может быть результатом интрузий вод Карского моря в акваторию залива. Очевидно, что различие механизмов опреснения поверхностных вод в двух заливах определяется степенью их изолированности, т. е. наличием естественных преград для свободного обмена поверхностными водами их акваторий с Карским морем в заливе Цивольки и их отсутствием в заливе Седова. Не менее мощным фактором можно считать и непосредственный выход в залив Цивольки ледника Серп и Молот, и отсутствие ледниковых выходов в заливе Седова.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Соотношение локальных и глобальных источников опреснения в заливах Новой Земли является неоднородным по глубине. Воды континентального стока присутствуют главным образом в пределах поверхностного слоя. Пресный компонент, представленный атмосферными осадками высоких широт, прослеживается только в водах под галоклином. Локальный опресняющий компонент, представленный стоком с архипелага Новая Земля, встречается как в поверхностных водах (залив Цивольки), так и в водах под галоклином (залив Седова). По-видимому, распределение опресняющих компонентов уникально для каждого из заливов и определяется географическими и морфологическими особенностями, строением дна и степенью открытости из акваторий.

В работе предложены новые подходы, позволяющие оценить соотношение разных пресных источников при таком многокомпонентном смешении. В координатах «изотопный состав—соленость» может быть применен метод множества реперных линий двухкомпонентного смешения, относительно которых можно проследить изменение соотношений опресняющих компонентов с падением солености. Расчет дейтериевого эксцесса в опресняющем компоненте позволяет

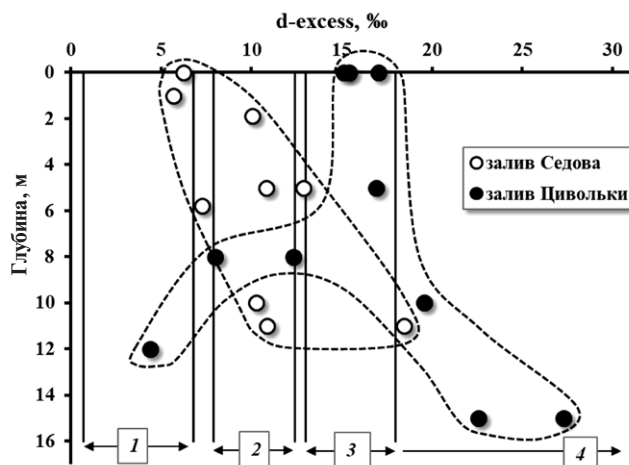


Рис. 10. Рассчитанный избыток дейтерия в компоненте, опресняющем поверхностные воды заливов Седова и Цивольки в 2015 г. Интервалы, характерные для потенциальных источников опреснения: 1 — воды реки Оби в июле-сентябре 2015 г., 2 — воды реки Енисея в то же время, 3 — локальный сток с Новой Земли и локальные атмосферные осадки, 4 — преимущественно талые воды ледника.

идентифицировать воды с близкими изотопными характеристиками. Данные подходы можно применять в изучении других районов Мирового океана.

**Источник финансирования.** Изотопные исследования выполнены при поддержке грантов РФФИ 18-05-00740 и 18-05-60246. Разработка методов интерпретации сложноопресненных морских вод проведена при поддержке гранта РНФ № 18-17-00089.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубинина Е. О., С. А. Коссова, А. Ю. Мирошников, Н. М. Кокрятская. Изотопная ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) систематика вод морей Арктического сектора России // Геохимия. 2017а. № 11. С. 1041-1052.
2. Дубинина Е. О., С. А. Коссова, А. Ю. Мирошников, Р. В. Файзулина. Изотопные ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) параметры и источники опресненных вод Карского моря // Океанология. 2017б. Т 57. № 1. С. 38-48.
3. Зацепин А. Г., Завьялов П. О., Кременецкий В. В. и др. Поверхностный опресненный слой в Карском море // Океанология. 2010. Т 50. № 5. С. 698-708.
4. Коссова С. А., Дубинина Е. О., Мирошников А. Ю., Надъярных Г. И., Бизяева А. В. Изотопные параметры ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) и источники опресненных вод заливов Новой земли // XXI симпозиум по геохимии изотопов, тезисы докладов. М: ГЕОХИ, 2016. С. 304-306.
5. Михаленко В. Н., Кутузов С. С., Екайкин А. А. и др. Изотопный состав снега и льда на ледниках Новой Земли // Лед и Снег. 2017. Т. 57. № 3. С. 293-306.
6. Н. Н. Зыкин, Л. Е. Рейхард. Результаты изотопных исследований дрейфующих льдов и океанических

- вод северного полюса по данным экспедиции «Барнео-2013» и «Барнео-2014». XXI симпозиум по геохимии изотопов, тезисы докладов. М: ГЕОХИ, 2016. С. 298-301.
7. Никифоров Е. Г., А. О. Шнайхер. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана // Л.: Гидрометеиздат, 1980, 269 с.
  8. Ферронский В. И., Поляков В. А. Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир, 2009. С. 632.
  9. Флинт М. В., С. Г. Поярко. Комплексные исследования экосистемы Карского моря (128-й рейс НИС «Профессор Штокман») // Океанология. 2015. Т. 55. № 4. С. 723-726.
  10. Aemisegger F., Pfahl S., Sodemann H. et al. Deuterium excess as a proxy for continental moisture recycling and plant transpiration // Atmospheric Chemistry and Physics. 2014. V. 14. P. 4029-4054.
  11. Bauch D. The distribution of  $\delta^{18}\text{O}$  in the Arctic Ocean: Implications for the freshwater balance of the Halocline and the Sources of Deep and Bottom Waters // Ber. Polarforsch. 1995. V. 159. P. 1-144.
  12. Bauch D., Erlenkeuser H., Stanovoy et al. Freshwater distribution and brine waters in the southern Kara Sea in summer 1999 as depicted by  $\delta^{18}\text{O}$  results // Siberian river run-off in the Kara sea / Ed. Stein R. et al. (Elsevier, Amsterdam, 2003) P. 73-90.
  13. Craig H., Gordon L. Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and the marine atmosphere // Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures 1965, Spoleto, Italy, P. 9-130.
  14. Craig H. Isotopic Variation in Meteoric Waters // Science (New York, N. Y.). 1961. V. 133. P. 1702-1703.
  15. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. 1964. V. 19. P. 435-463.
  16. Ekwurzel B., Schlosser P., Mortlock R., Fairbanks R. River runoff, sea ice meltwater, and Pacific water distribution and mean residence times in the Arctic Ocean // Journal of Geophys. Res. 2001. V. 106 (C5). P. 9075-9092.
  17. 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.
  18. Gordeev V. V., Martin J. M., Sidorov I. S., Sidorova M. V. A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean // Amer. J. Sci. 1996. № 296, P. 664-691.
  19. Harms I. H., Karcher M. J. Modeling the seasonal variability of hydrography and circulation in the Kara Sea // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. № 6. P. 13341-13448.
  20. Holmes R. M., J. W. McClelland, S. E. Tank et al. 2018. Arctic Great Rivers Observatory. Water Quality Dataset. Version 20180427. <https://www.arcticgreatrivers.org/data>
  21. IAEA (2018). Global Network of Isotopes in Precipitations. The GNIP Database. Accessible at: <https://nucleus.iaea.org/wiser>
  22. Merlivat L. and Jouzel J. Global Climatic interpretation of the deuterium excess-oxygen 18 relationship for precipitation // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. P. 5029-5033.
  23. Ostlund H. G., Hut G. Arctic Ocean Water Mass Balance From Isotope Data // J. Geophys. Res. 1984. V. 89. P. 6373-6381.
  24. Pavlov V. K., Pfirman S. L. Hydrographic structure and variability of the Kara Sea: Implications for pollutant-distribution // Deep-Sea Res. 1995. V. 42 (6). P. 1369-1390.
  25. Schlosser P., Bauch D., Fairbanks R., Bonisch G. Arctic river-runoff: mean residence time on the shelves and in the halocline // Deep-Sea Res. 1994. V. 41. № 7. P. 1053-1068.
  26. Shiklomanov A. I., R. M. Holmes, J. W. McClelland et al. 2018. Arctic Great Rivers Observatory. Discharge Dataset. Version 20180523. <https://www.arcticrivers.org/data>

## SOURCES AND MECHANISMS OF SEAWATER FRESHENING AT THE TSIVOL'KI AND SEDOV' BAYS (NOVAYA ZEMLYA): ISOTOPE ( $\delta\text{D}$ , $\delta^{18}\text{O}$ ) DATA

© 2019 E. O. Dubinina\*, S. A. Kossova, A. Yu. Miroshnikov

*Institute of geology of ore deposits, petrography, mineralogy and geochemistry RAS, Moscow, Russia*

\*e-mail: [elenadelta@gmail.com](mailto:elenadelta@gmail.com)

Received April 25, 2019

Revised version received June 4, 2019

After revision June 18, 2018

Three-year monitoring of isotope ( $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) parameters in the waters of the Sedov' and Tsvivol'ki bays (Novaya Zemlya) was carried out. The fresh waters of the bays are originated from several sources (continental runoff, precipitations, and waters going from the archipelago). The freshening extent and sources of fresh waters are different at the different depth. The  $\delta\text{D}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values varies only in the surface waters which contains more than 30% of fresh component. In 2015 the surface waters of Sedov' bay were represented by Ob' river waters, and the surface waters of Tsvivol'ki bay were enriched by the runoff from Novaya Zemlya. Deep waters in both bays show signs of desalination by high latitude atmospheric precipitations. These waters can be transferred to the southeast coast of Novaya Zemlya through the trenches of St. Anne and Voronin. The difference in the freshening mechanisms of the waters of Sedov and Tsvivolka bays is determined by different bottom morphologies and different degrees of free water exchange with the Kara Sea.

**Keywords:** oxygen and hydrogen isotopes, bays of Novaya Zemlya, seawater freshening, Kara sea, continental runoff