

УДК 551.465

ИЗОТОПНЫЕ (δD , $\delta^{18}O$) ПАРАМЕТРЫ И ИСТОЧНИКИ ОПРЕСНЕННЫХ ВОД КАРСКОГО МОРЯ

© 2017 г. Е. О. Дубинина¹, С. А. Коссова¹, А. Ю. Мирошников¹, Р. В. Фяйзуллина²¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет

e-mail: elenadelta@gmail.com

Поступила в редакцию 07.06.2016 г.

Изучены изотопные характеристики (δD , $\delta^{18}O$) вод Карского моря для количественной оценки пресноводного стока на станциях, расположенных вдоль профиля от п-ова Ямал до залива Благополучия (Новая Земля). Пробы пресных вод изучены для ледников (Розе, Серп и Молот) и устьевых вод Оби и Енисея. Величины δD и $\delta^{18}O$ ледников в целом более высокие, чем в водах речного стока. Вода из устья реки Обь характеризуется величинами $\delta D = -131.4$ и $\delta^{18}O = -17.6$ ‰. Для воды из устья Енисея найдены как составы близкие к параметрам реки Обь (-134.4 и -17.7 ‰), так и более изотопно “тяжелые” (-120.7 и -15.8 ‰). Воды изученного разреза Карского моря могут являться продуктом смешения пресных ($\delta D = -119.4$, $\delta^{18}O = -15.5$) и морских ($S = 34.9$, $\delta D = +1.56$, $\delta^{18}O = +0.25$) вод, близких по составу к водам Баренцева моря. Установлено, что в поверхностном слое вместе с соленостью резко изменяются изотопные параметры воды, и что на протяжении всего изученного профиля воды Карского моря опреснены за счет речного стока. Содержание пресных вод составляет в основной части водной толщи – 5–10%, на глубинах свыше 100 м – менее 5%. Максимальная доля пресного компонента (выше 65%) наблюдается в области поверхностного слоя в центральной части моря.

DOI: 10.7868/S003015741701004X

ВВЕДЕНИЕ

Проблема идентификации водных масс, процессов их смешения и формирования течений в толще вод Арктического бассейна занимает одно из центральных мест в изучении Мирового океана. В этом контексте слабая изученность изотопных ($\delta^{18}O$ и δD) параметров водных масс арктического шельфа России является большим пробелом в современной системе знаний. Особенно это актуально для понимания процессов опреснения вод Карского моря, в которое ежегодно поступает свыше 1.5 тысяч км³ континентального речного стока, что составляет более трети от общего континентального стока в акваторию Арктики [19]. Вместе со стоком в море приносится более 150 млн. т аллохтонного вещества, несущего широкий спектр загрязнений [6, 22] в том числе и радиоактивных. Радионуклиды, поступающие в Карское море из водосборных бассейнов Оби и Енисея – как в виде перераспределенных глобальных выпадений, так и поступающие от радиохимических предприятий, задерживаются, как правило, в зоне смешения речных и морских вод [4]. Однако часть загрязнений преодолевает фронтальные зоны в эстуариях, как в растворенной форме, так и в сорбированном на взвеси виде. Дальнейшей миграции загрязнений, поступаю-

щих с речным стоком на шельф, вплоть до берегов Новой Земли, способствует резкая стратификация поверхностных вод Карского моря, наличие которой отмечалось при исследованиях, проведенных в разные годы [3, 6, 7]. Таким образом, идентификация источников и количественное соотношение водных масс, формирующих поверхностный опресненный слой в Карском море, является крайне актуальной задачей.

В данной работе изучались изотопные характеристики опресненного поверхностного слоя с применением изотопной геохимии кислорода и водорода, которая позволяет решать генетические задачи в гидрологии морских бассейнов на высоком доказательном уровне.

Природные изотопные метки воды (δD , $\delta^{18}O$) позволяют не только различать водные потоки и проводить количественную оценку содержания вод разного происхождения в конкретной водной массе, но и проследивать наличие фазовых переходов в истории конкретной водной массы [5, 17]. При изучении морских бассейнов высокоинформативным является сопоставление изотопных данных с данными о солености, поскольку соленость и изотопный состав водорода и кислорода ведут себя аналогично при фазовых переходах и смешении вод разного генезиса [16]. Следова-

тельно, отбор проб, сопровождающийся гидрофизическими данными и точными привязками к характеристикам водной массы, является определяющим фактором изотопных исследований морских вод. Дополнительное преимущество применения изотопных методов к изучению процессов опреснения морских вод состоит в том, что изотопная метка воды позволяет различить пресный компонент разного происхождения (ледниковый, речной, атмосферный). В ряде случаев можно установить не только тип пресного компонента, но и конкретный его источник. Например, крупные северные реки России, являющиеся основным поставщиком пресного стока в зону арктических морей, закономерно различаются по своим изотопным (δD и $\delta^{18}O$) параметрам [8, 12, 15]. Это оставляет перспективу для точной идентификации водных масс, участвующих в опреснении арктических морей.

Традиционным является изучение одной из изотопных систем воды (обычно кислорода) и проведение интерпретации данных в рамках корреляции величин солености и $\delta^{18}O$ [8, 9, 13–15 и другие работы]. Однако применение анализа двух изотопных систем – водорода и кислорода – расширяет возможности идентификации компонентов в координатах δD – $\delta^{18}O$, имеющих физический и генетический смысл [23]. Более того, в этих координатах возможна верификация моделей двух- и более компонентного смешения, а также установление процессов испарения и заморзания в истории водных масс.

Для работы с морскими водами требуется высокая точность изотопного анализа, поскольку обычно вариации величин δD и $\delta^{18}O$ в толще морской воды не превышают первых промилле, а в активно перемешиваемых ее сегментах эти величины могут находиться на уровне погрешности измерений. Например, вариации δD в центральной части Черного моря не превышают первых промилле. При анализе изотопного состава водорода старыми (до 1990-х годов) методами, имеющими точность $\pm 5\%$, эти вариации были бы неразличимы. Развитые в последние годы методы прецизионного изотопного анализа водорода имеют точность на 1.5 порядка выше (около $\pm 0.3\%$), что позволило, например, установить тонкие изотопные вариации и выделить разные водные массы в толще вод Черного моря [1].

Учитывая все перечисленные факторы, можно суммировать определенные требования к проведению изотопно-гидрологических исследований морских вод: корректный отбор проб, сопровождающийся детальными гидрофизическими данными, изучение двух изотопных систем (δD и $\delta^{18}O$) и применение методов изотопного анализа, имеющих высокую точность. Все эти факторы были соблюдены при изучении водной толщи

Карского моря с целью установления источников, конфигурации опресненного слоя и получения количественных оценок распределения вклада пресноводного стока в воды Карского моря.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изотопный состав кислорода и водорода был изучен в образцах вод Карского моря, отобранных в 128-м рейсе НИС “Профессор Штокман” 2014 г. [6]. Схема расположения изученных станций приведена на рис. 1. Пробы морских вод отбирались на станциях, расположенных вдоль профиля от п-ова Ямал до залива Благополучия архипелага Новая Земля (станции 4–7 и 9–12). Пробы пресных вод – на ледниках Розе, Серп и Молот, в устьях рек Обь (ст. 18) и Енисей (станции 25–28). Отбор проводился с использованием гидрофизического комплекса “Розетта”, снабженного необходимыми датчиками и комплектом батометров Нискина. Для каждой станции изучался вертикальный профиль распределения гидрофизических параметров и величин δD и $\delta^{18}O$.

Изотопный анализ кислорода проведен методом изотопного уравнивания воды с CO_2 с использованием приборного комплекса Gas-Bench II и автосамплера PAL. Размер образца воды, температура и длительность реакции изотопного обмена составляли 0.5 см^3 , $32^\circ C$ и 18 часов соответственно. Измерения изотопного состава кислорода в CO_2 проведены на масс-спектрометре DELTA V+, работающем в режиме постоянного потока гелия (метод CF IRMS). Изотопный анализ водорода проведен методом разложения микро-образцов (0.001 см^3) воды на горячем ($800^\circ C$) хrome с использованием приборного комплекса H/Device и масс-спектрометра DELTAplus, работающего в режиме двойного напуска (метод DI IRMS). Величины δD и $\delta^{18}O$ водных образцов калиброваны в шкале “V-SMOW–V-SLAP” с использованием внутренних стандартов и образцов сравнения МАГАТЭ (ОН–1...ОН–4 и ОН–13...ОН–16), калибровка которых относительно стандартов V-SMOW и V-SLAP проводится в лаборатории регулярно. Точность определения величин $\delta^{18}O$ и δD составила ± 0.2 и $\pm 0.3\%$ соответственно. Изотопные данные для вод станций ямальского профиля приведены в табл. 1 вместе с данными о глубине отбора проб и солености. Изотопные данные для ледниковых и речных вод приведены в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Воды Карского моря. Воды станций 4–7 и 9–12, расположенных вдоль профиля от п-ова Ямал до залива Благополучия (ямальский профиль) показывают разбавление пресным компонентом, ко-

Таблица 1. Результаты изотопных исследований вод Карского моря

Номер станции (глубина), координаты (с.ш.; в.д.)	Глубина, м	S , епс	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	δD , ‰	X (доля пресного компонента)
1	2	3	4	5	6
128-04 (154) (71°45.2'; 65°45.6')	3	25.88	-4.6	-36.3	0.31
	8	26.24	-3.2	-26.2	0.23
	15	32.34	-1.1	-10.8	0.10
	20	33.17	-0.7	-7.7	0.08
	30	33.58	-0.7	-7.6	0.08
	40	33.72	-0.5	-6.4	0.07
	80	34.39	-0.2	-2.8	0.04
	110	34.57	-0.5	-4.7	0.05
	125	34.64	-0.6	-5.7	0.06
	151	34.77	-0.7	-6.7	0.07
128-05 (105) (72°25'; 65°28')	2	23.66	-5.7	-46.4	0.40
	5	23.79	-4.6	-37.0	0.32
	10	30.41	-2.0	-17.3	0.16
	20	33.35	-0.5	-6.8	0.07
	36	33.63	-0.7	-6.7	0.07
	50	33.71	-0.6	-6.7	0.07
	75	34.34	-0.5	-4.7	0.05
	101	34.46	-0.6	-4.9	0.05
128-06 (76) (72°53'; 65°30')	2	22.28	-6.0	-48.4	0.41
	7	22.84	-5.1	-41.5	0.36
	16	32.61	-0.8	-9.7	0.09
	25	33.44	-0.5	-6.6	0.07
	30	33.56	-0.3	-6.2	0.06
	40	33.66	-0.4	-5.7	0.06
	60	33.98	-0.5	-5.8	0.06
	74	34.10	-0.5	-4.9	0.05
128-07 (64) (73°20'; 65°40')	1	11.69	-10.5	-80.6	0.68
	4	11.88	-10.2	-79.1	0.67
	8	16.98	-7.8	-60.6	0.51
	18	32.84	-1.5	-13.0	0.12
	25	33.53	-0.6	-6.1	0.06
	35	33.64	-0.7	-7.2	0.07
	50	33.81	-0.5	-5.7	0.06
	62	34.09	-0.6	-4.7	0.05
128-09 (61) (74°42.3'; 64°54')	2	25.91	-4.9	-36.4	0.31
	4	27.77	-2.5	-20.0	0.18
	8	29.24	-1.7	-13.7	0.13
	17	33.25	-0.4	-4.8	0.05
	25	33.45	-0.3	-2.7	0.03
	35	33.72	-0.2	-1.9	0.03
	45	33.86	-0.1	-1.7	0.03
	58	33.92	-0.1	-1.6	0.03

Таблица 1. Окончание

Номер станции (глубина), координаты (с.ш.; в.д.)	Глубина, м	S, епс	$\delta^{18}O$, ‰	δD , ‰	X (доля пресного компонента)
1	2	3	4	5	6
128-10 (260) (75°03.7'; 64°34.2')	1	29.90	-0.8	-6.9	0.07
	7	30.04	-0.7	-6.2	0.06
	14	32.97	-0.7	-5.9	0.06
	20	33.36	-0.6	-5.3	0.06
	32	33.58	-0.5	-5.6	0.06
	50	33.97	-0.2	-2.7	0.04
	65	34.31	-0.1	-1.7	0.03
	100	34.37	0.0	-1.5	0.02
	140	34.40	0.1	-1.0	0.02
	200	34.46	0.2	-1.0	0.02
	225	34.50	0.1	-0.9	0.02
	256	34.61	0.3	-0.4	0.02
128-11 (350) (75°23.1'; 64°18.1')	1	29.53	-0.7	-6.0	0.06
	8	32.05	-0.6	-5.7	0.06
	15	32.36	-0.6	-5.0	0.05
	20	32.51	-0.5	-5.4	0.06
	30	33.13	-0.5	-4.9	0.05
	45	33.66	-0.3	-3.6	0.04
	75	34.06	-0.2	-2.9	0.04
	100	34.36	0.0	-1.5	0.03
	150	34.48	0.1	-1.2	0.02
	200	34.56	0.1	-0.7	0.02
	250	34.62	0.2	-0.4	0.02
	300	34.69	0.2	-0.7	0.02
348	34.73	0.2	-0.1	0.01	
128-12 (30) (75°35.6'; 63°41.9')	2	31.03	-1.5	-11.2	0.11
	5	31.41	-0.7	-5.3	0.06
	10	32.56	-0.5	-4.4	0.05
	15	33.22	-0.4	-3.6	0.04
	20	33.46	-0.4	-3.3	0.04
	27	33.77	-0.2	-2.8	0.04

торое неоднородно проявлено в пространстве. Резкое изменение солёности и изотопных параметров воды наблюдается для тонкого поверхностного слоя (не более 25 м, а в среднем – около 10 м) (рис. 2). Это позволяет заключить, что разбавление пресными водами имеет резкий градиент по глубине (рис. 2), т.е. в поверхностной зоне в центре моря формируется слой сильно опреснённых вод с низкой солёностью и изотопными параметрами, близкими к составу атмосферных вод (величина δD , например, достигает -80‰). На изотопной $\delta D-\delta^{18}O$ диаграмме (рис. 3) хоро-

шо проявлен линейный тренд, сформированный точками проб ямальского профиля ($y = 7.60x - 1.46$, $R^2 = 0.997$).

Для вод изученного разреза характерна строгая корреляция изотопных параметров с солёностью (рис. 4), что указывает на двухкомпонентное смешение пресного и морского компонента. Экстраполяция на нулевую солёность линейного тренда, приведенного на рис. 4 (и аналогичной зависимости для изотопного состава кислорода от солёности), позволяет рассчитать характеристики

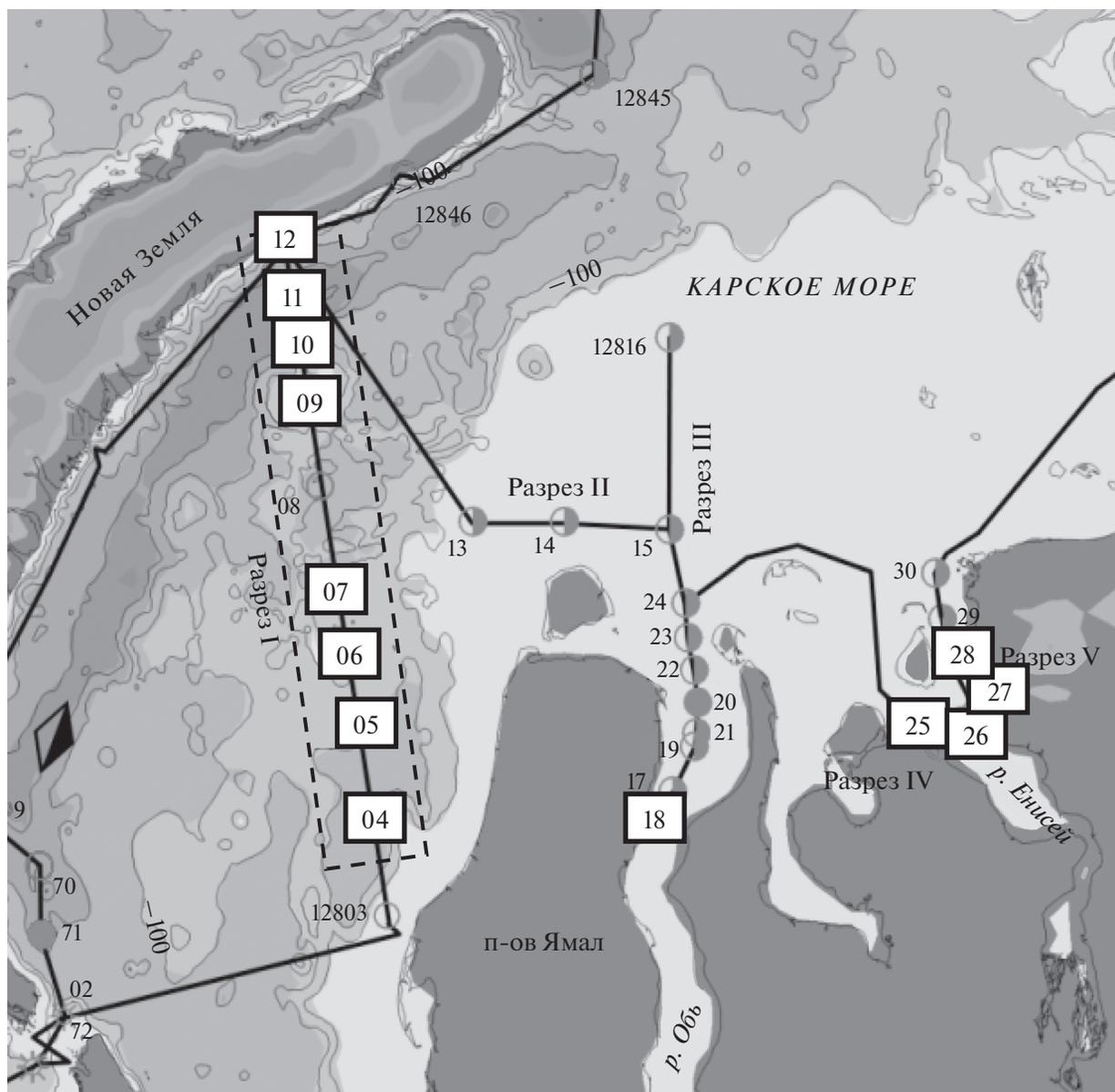


Рис. 1. Схема отбора проб в 128-м рейсе НИС «Профессор Штокман» (2014 г.) в Карское море. Прямоугольники с номерами – станции, на которых отбирался материал для изотопных исследований: станции 04-07 и 09-12 – ямальский профиль через зону опреснения; речные станции – 18 (Обь) и 25–28 (Енисей).

опресняющего компонента для вод Карского моря вдоль ямальского профиля (табл. 2, рис. 4).

Воды рек. Вода реки Обь характеризуется величинами δD и $\delta^{18}O$, равными -131.4 ± 0.2 и $-17.6 \pm 0.03\text{‰}$ соответственно. Вода реки Енисей показала бимодальное поведение изотопных параметров. На станциях 25 и 26 величины δD и $\delta^{18}O$ близки к установленным в реке Обь (-134.4 и -17.7‰), а на станциях 27 и 28 эти величины существенно более высокие (-120.7 и -15.8‰). Такое поведение изотопных параметров в пределах небольшого участка устья одной и той же реки

(рис. 1), указывает на процесс трансформации вод, например, за счет смешения или замерзания. Согласно опубликованным данным, для вод Оби характерны более высокие (примерно на 2‰) величины $\delta^{18}O$, чем для вод Енисея [8, 15 и ссылки в этих работах]. Полученные нами данные для устьевых станций не поддерживают это общее соотношение, но подобные отклонения изотопных характеристик этих рек наблюдались и ранее [7].

Ледники Новой Земли. Изотопный состав кислорода и водорода ледников Новой Земли ($\delta D = -94.1 \dots -122.8$, $\delta^{18}O = -13.4 \dots -17.0$) является в

Таблица 2. Изотопные характеристики и соленость основных источников водных масс в районе Карского моря

Название компонента	Метод оценки	δD , ‰	$\delta^{18}O$, ‰	S , епс
Неопресненные воды Баренцева моря	Прямые измерения, $n = 44$	$+1.56 \pm 0.4$	$+0.25 \pm 0.1$	34.9
Трансформированные воды Енисея (ст. 27, 28)	Прямые измерения, $n = 2$	-120.7	-15.7	0
Устье Енисея (ст. 25, 26)	Прямые измерения, $n = 2$	-134	-17.7	0
Устье Оби (ст. 18)	Прямые измерения, $n = 3$	-131.4	-17.6	0
Ледники Новой Земли (Розе, Серп и Молот)	Прямые измерения, $n = 9$	-94...-123	-13.4...-17.0	0
Пресный компонент, поступающий в центральную часть Карского моря	Расчет по соотношению “изотопный состав–соленость” (экстраполяция на $S = 0$)	-119.4	-15.5	0

целом более “тяжелым”, чем состав вод основного речного стока – Оби и Енисея (рис. 5). Фигуративные точки ледников на изотопной δD – $\delta^{18}O$ диаграмме располагаются вдоль линии Крейга ($\delta D = 8.06\delta^{18}O + 14.2$ ($R^2 = 0.997$)), что указывает на их атмосферный генезис с характерным для осадков данного района высоким избытком дейтерия [11]. Ледник Серп и Молот в бухте Цивольки характеризуется более высокими величинами δD и $\delta^{18}O$, чем ледник Розе. По-видимому, это связано с разным изотопным составом атмосферных осадков, выпадающих в пределах архипелага Новая Земля. Воды небольшой реки, берущей начало под ледником Серп и Молот, имеют величины δD и $\delta^{18}O$, лежащие в пределах интервала, установленного для проб самого ледника (рис. 5). Состав этих вод можно принять в качестве усредненных величин ледниковых отложений Серп и Молот.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В отличие от описываемых в литературе ситуаций в других акваториях арктического региона [8–10 и другие работы], в центре Карского моря проявлено простое бинарное смещение изотопно-утяжеленного соленого и изотопно-легкого пресного компонентов без признаков участия других источников воды (например, морского льда). В данном случае, задача поиска источника и оценки вклада пресноводного стока для центра Карского моря существенно упрощается. Для расчета вклада пресного компонента необходимо установить изотопные параметры крайних членов – “соленого” (“морского”) и “пресного”. В качестве “морского” компонента может быть принят состав неопресненных вод Баренцева моря, имеющих соленость 34.90 ± 0.05 [2], которому соответствует положение верхней части линейного тренда, построенного для точек вод ямальского

профиля на диаграмме δD – $\delta^{18}O$. Установленный нами состав вод Баренцева моря попадает в интервал оценок величин δD ($0...+2$) и $\delta^{18}O$ ($+0.3...-0.2$), приводимых разными авторами в качестве характеристики арктических вод [18, 21].

Изотопные параметры “пресного” компонента можно установить при анализе данных в координатах “изотопный состав–соленость”, используя экстраполяцию линейного тренда на нулевую соленость. Как следует из диаграммы δD – S (рис. 4), в водах изученного профиля Карского моря присутствует пресный компонент с изотопным составом водорода $\delta D = -119.4$. Аналогичный тренд, построенный в координатах $\delta^{18}O$ – S , дает изотопный состав кислорода пресного компонента $\delta^{18}O = -15.5$ ‰ (табл. 2). Эти составы очень близки к составам вод отобранных на станциях 27 и 28 в устье р. Енисей. Положение нижней части тренда ямальского профиля и вычисленного состава пресного компонента на диаграмме δD – $\delta^{18}O$ (рис. 5) показывает, что пресным компонентом для вод центральной части Карского моря являются именно речные воды, и что этим компонентом не могут являться ледники Новой Земли.

Преимущественно речное происхождение пресного компонента в Карском море не вызывает сомнений, но более точной информации, например, численной оценки персонального вклада каждой из крупных рек, в данный момент получить невозможно. Это связано с отсутствием для рек Обь и Енисей однозначных оценок их изотопных характеристик. Например, данные о поведении величин $\delta^{18}O$, варьирующих сезонно и в многолетнем масштабе [8, 12, 15] являются открытыми, а изотопный состав водорода в водах северных рек России почти не изучен. Очевидно, что полученные нами данные нельзя использовать как однозначные характеристики водных масс Оби и Енисея, поскольку станции отбора

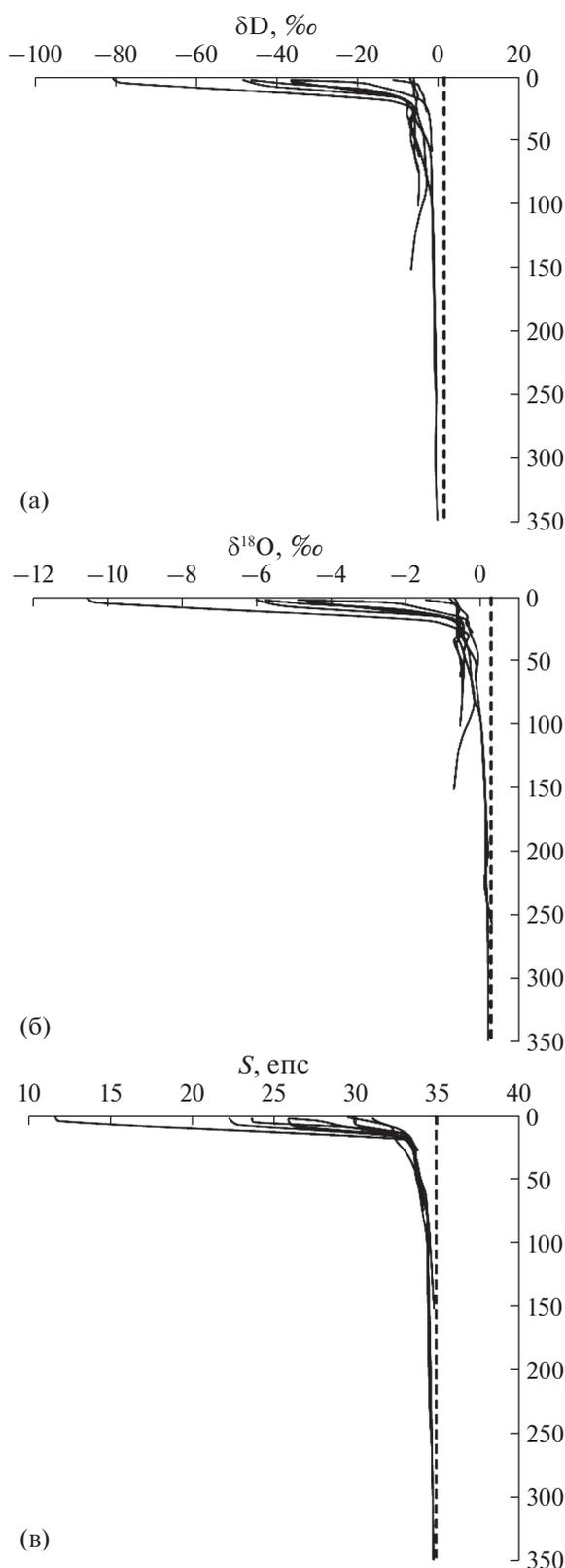


Рис. 2. Вертикальное распределение величин δD (а), $\delta^{18}O$ (б) и солёности (в) станций ямальского профиля. По оси Y отложена глубина в метрах. Пунктирные линии – параметры неопреснённых вод Баренцева моря ($S = 34.9$, $\delta D = 1.56 \pm 0.4$, $\delta^{18}O = 0.25 \pm 0.1 \text{‰}$).

проб были недостаточно удалены от устьевых зон этих рек, что не позволяет исключить смешение их водных масс друг с другом. Тем не менее, наши данные пригодны для общей оценки источника пресноводного стока, поскольку в опреснении вод Карского моря вряд ли принимают непосредственное участие неизменные или изолированные друг от друга речные воды. Воды реки Енисей, показавшие бимодальное распределение изотопных параметров, отбирались на станциях, расположенных на западном и восточном побережьях устья, и могли быть в разной степени трансформированы при замерзании или смешении с водой реки Обь. Поступление вод из реки Обь в эстуарий реки Енисей отмечалось ранее по изотопно-кислородным данным [7], что рассматривалось авторами как следствие преобладания северных ветров в период проведения работ. Однако нельзя исключать, что процессы формирования речного льда также могли изменить изотопные параметры воды в устье реки Енисей. На рис. 5 показана линия тренда, проведенного через все точки проб, отобранных на реке Енисей (станции 25–28). Наклон тренда ($= 6.7$) близок к наклону, формирующемуся при замерзании пресных вод [20]. Пересечение этого тренда с трендом, построенным по точкам ледников Новой Земли, происходит в области $\delta^{18}O \approx -22\text{‰}$, что практически соответствует усредненному изотопному составу кислорода атмосферных осадков данного региона [18]. Весьма вероятно, что и в составы ледниковых отложений, и в составы устьевых зон речных вод входит общий компонент локального атмосферного генезиса. Кроме того, в устье Енисея могут находиться как воды, поступающие из реки Обь (в районе станций 25 и 26), так и воды, трансформированные в процессах замерзания (станции 27 и 28). Интересно, что именно трансформированные воды реки Енисей, состав которых отклоняется от линии метеорных вод, наиболее точно соответствуют рассчитанному составу пресного компонента для вод ямальского профилля.

Для количественной оценки содержания пресных вод в водах Карского моря вдоль ямальского профилля была использована простая модель двухкомпонентного смешения неопреснённых вод Баренцева моря и пресного компонента, состав которого получен из соотношений “изотопный состав–солёность”. Поскольку состав этого компонента соответствует составу трансформированных вод реки Енисей (станции 27, 28), можно считать, что для профилля рассчитывалась доля трансформированных речных вод этой реки. Результаты расчета приведены на рис. 6 и в последней колонке табл. 1, из которых следует, что на всем изученном разрезе не присутствуют морские воды без примеси пресного компонента. В основной части водной толщи моря его содержание ва-

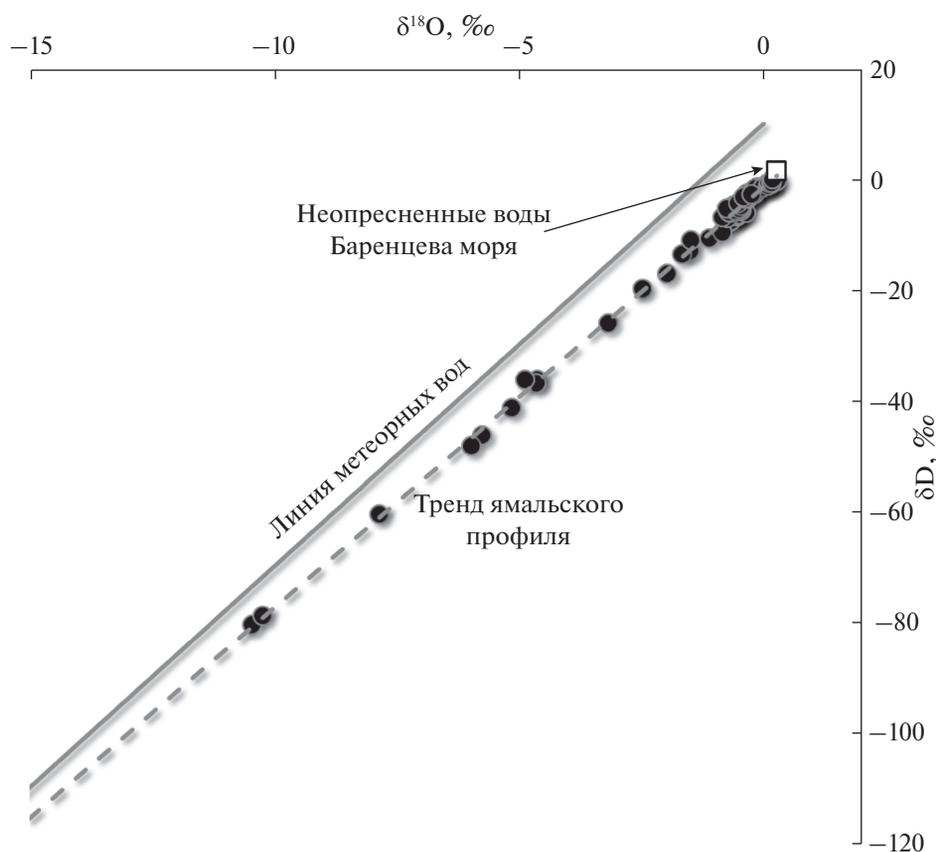


Рис. 3. Изотопные (δD , $\delta^{18}O$) параметры вод Карского моря вдоль профиля от п-ова Ямал до залива Благополучия (Новая Земля).

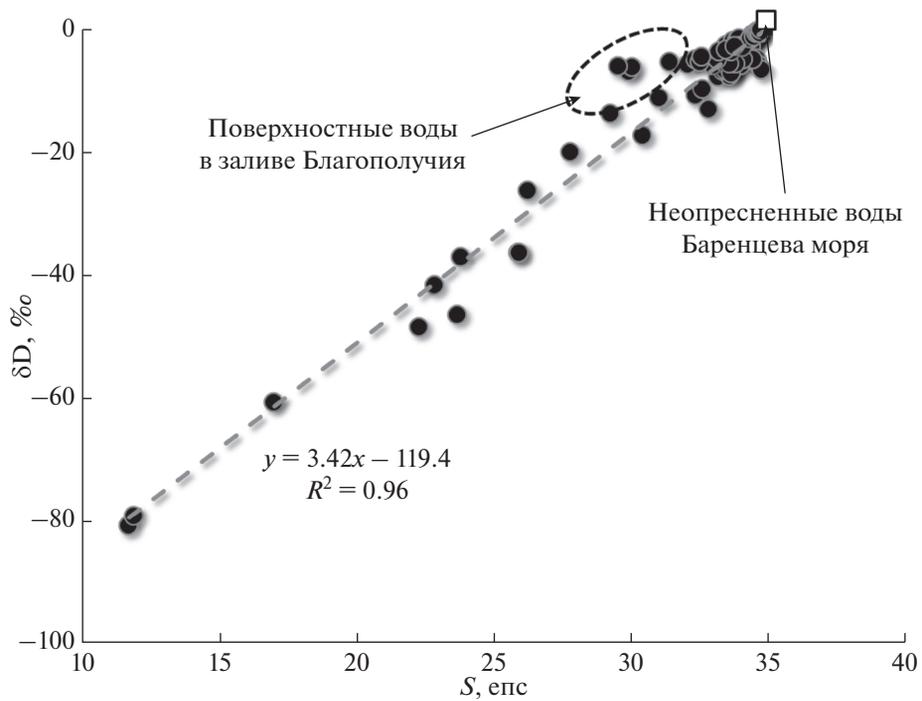


Рис. 4. Связь изотопного состава водорода с соленостью в водах Карского моря, отобранных вдоль ямальского профиля.



Рис. 5. Изотопная (δD , $\delta^{18}O$) систематика пресных вод в районе Карского моря.

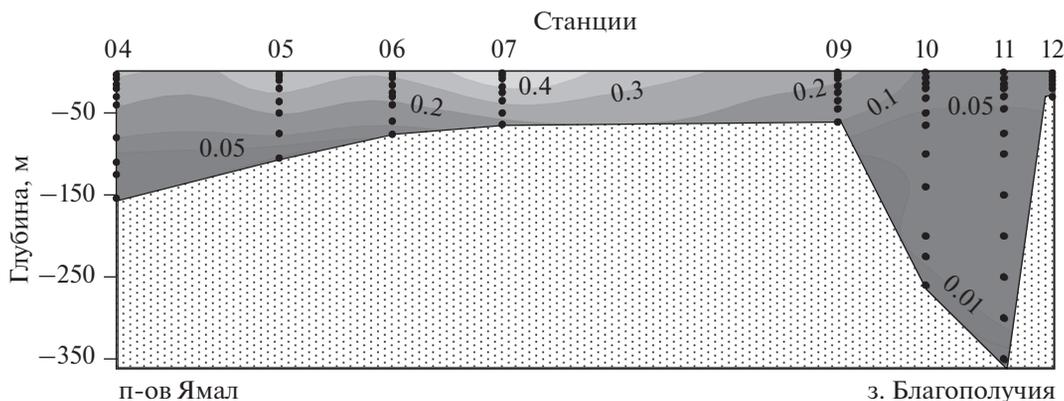


Рис. 6. Доля пресного компонента в водах Карского моря. Расчет проведен для двухкомпонентного смешения неопресненных вод Баренцева моря и трансформированных вод реки Енисей (станции 27, 28).

рирует от 5 до 10%, на глубинах свыше 100 м, оно не превышает 5%, но даже для самых глубоководных зон изученного профиля оно не является нулевым.

Максимальная доля пресноводного компонента наблюдается в области поверхностного слоя воды в центральной части моря, где его доля достигает 67–68% (в поверхностных водах ст. 07, табл. 1). Для вод этой станции доля пресного компонента падает от 67% на глубине 4 м до 51% на глубине 8 м и составляет всего 12% на глубине 18 м. Аналогичные резкие градиенты наблюдаются и на всех

остальных станциях (табл. 1). Таким образом, проведенные измерения и расчеты согласуются с наличием резкого градиента изотопных параметров и солености в области поверхностного слоя Карского моря, в пределах первых 20 м и указывают на устойчивую стратификацию вод Карского моря, возникающую за счет речного стока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа представляет первые систематические данные по распределению изотопных

параметров (δD и $\delta^{18}O$) в водах Карского моря и окружающих водных резервуарах данного региона. Полученная систематика позволила установить основные источники компонентов, формирующих водную толщу и поверхностный опресненный слой моря. Основным источником арктических морских вод в Карском море являются неопресненные воды Баренцева моря ($S = 34.9$), пресных вод – вода из устья реки Енисей, изотопные параметры которой трансформированы при замерзании. Возможно, что в источник пресных вод вносит вклад сток из реки Обь, однако имеющиеся на данный момент результаты не позволяют подтвердить или опровергнуть это предположение. Вклад ледниковых вод в формирование поверхностного опресненного слоя в центре Карского моря маловероятен. Возможно, что он будет обнаружен непосредственно у побережья Новой Земли, но проверка этого является предметом дальнейших исследований.

Опресненный слой поверхностных вод, проявленный в центральной части моря, отличается резкими вертикальными градиентами солености и изотопных параметров и неравномерно распределен в пространстве. Можно констатировать, что в основном мощность опресненного слоя составляет первые 5–10 м, а к 20 м, как правило, происходит его полное выклинивание. Максимально резко опресненный слой проявляет себя в центре изученного ямальского профиля, где доля пресного компонента на поверхности моря может достигать 67–68% (ст. 07). В целом, воды всех станций на всех глубинах данного профиля не достигают ни солености, ни изотопных параметров, присущих неизменным водам Баренцева моря, что приводит к выводу о глобальном характере опреснения Карского моря.

Работа выполнена при поддержке РНФ (гранты № 14-50-00095, полевые работы и № 14-17-00764, обработка и анализ материала). Экспедиция поддержана проектом РФФИ № 14-05-05003Кар_а.

Авторы благодарят начальника 128-го рейса НИС “Профессор Штокман” М.В. Флинта и всех участников экспедиции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубинин А.В., Дубинина Е.О. Изотопный состав кислорода и водорода вод Черного моря как отражение динамики водных масс // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 6. С. 713–729
2. Дубинина Е.О., Коссова С.А., Фяйзуллина Р.В., Мирошников А.Ю. Изотопные (δD , $\delta^{18}O$) параметры вод Карского моря // *Материалы научной конференции: Экосистема Карского моря – новые данные экспедиционных исследований*. М.: АИР, 2015. С. 82–85.
3. Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Кубряков А.А., Станичный С.В., Соловьев Д.М. // Распространение и трансформация вод поверхностного опресненного слоя в Карском море // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 4. С. 502–513.
4. Мирошников А.Ю. Закономерности распределения радиоцезия в донных отложениях Карского моря // *Геоэкология*. 2012. № 6. С. 516–526.
5. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир, 2009. С. 632
6. Флинт М.В., Поляков С.Г. Комплексные исследования экосистемы Карского моря (128-й рейс научно-исследовательского судна “Профессор Штокман”) // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 4. С. 723–726.
7. 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. // *Siberian river run-off in the Kara sea* /Ed. Stein R. et al./ 2003. P. 73–90
8. Bauch D., Holemann J., Andersen N. et al. The Arctic shelf regions as a source of Freshwater and brine-enriched waters as revealed from stable oxygen isotopes // *Polarforschung*. 2010. V. 80. P. 127–140.
9. Bauch D., Groger M., Dmitrenko I., Holemann J. et al. Atmospheric controlled freshwater release at the Laptev Sea continental margin // *Polar research*. 2011. V. 30. P. 5858.
10. Bauch D., Hölemann J.A., Dmitrenko I.A. et al. Impact of Siberian coastal polynyas on shelf-derived Arctic Ocean halocline waters // *J. of Geophys. Res.* 2012. V. 117.
11. Bowen G. J. and Revenaugh J. Interpolating the isotopic composition of modern meteoric precipitation // *Water Resources Res.* 2003. V. 39. N. 10. P.1299
12. 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.
13. Cooper L.W., Whitley T.E., Grebmeier J.M., Weingartner T. The nutrient, salinity, and stable oxygen isotope composition of Bering and Chukchi Seas waters in and near the Bering Strait // *J. of Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. 12563–12573.
14. Cooper L.W., McClelland J.W., Holmes R.M. et al. Flow-weighted values of runoff tracers ($\delta^{18}O$, DOC, Ba, alkalinity) from the six largest Arctic rivers // *Geophys. Res. Letters*. 2008. V. 35. P. 18606.
15. Cooper L.W., Benner R., McClelland J.W. et al. Linkages among runoff, dissolved organic carbon, and the stable oxygen isotope composition of seawater and other water mass indicators in the Arctic Ocean // *J. of Geophys. Res.* 2005. V. 110. P. G02013
16. 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. /Ed. Tongiogi E. / V. Lishi e F., Pisa. P. 9–130.
17. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // *Tellus*. 1964. V. 19. P. 435–463
18. 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.
19. *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 // *Am. J. Sci.* 1996. V. 296. P. 664–691.
20. *Lehmann M., Siegenthaler U.* Equilibrium oxygen- and hydrogen-isotope fractionation between ice and water // *Journal of Glaciology.* 1991. V. 37. P. 23–26.
21. *Ostlund H.G., Hut. G.* Arctic Ocean Water Mass Balance From Isotope Data // *J. of Geophys. Res.* 1984. V. 89. P. 6373–6381.
22. *Pavlov V.K., Pfirmann S.L.* Hydrodynamic structure and variability of the Kara Sea: Implications for pollutant distribution // *Deep-Sea Res.* 1995. V. 42. P. 1369–1390.
23. *Sheppard S.M.F.* Characterization and isotopic variations in natural waters // *Reviews in mineralogy.* 1986. V. 16. P. 165–184.

Isotope (δD , $\delta^{18}O$) Composition and the Freshwater Input to the Kara Sea

E. O. Dubinina, S. A. Kossova, A. Yu. Miroshnikov, R. V. Fyaizullina

Isotope (δD , $\delta^{18}O$) composition of the Kara sea waters along the section from Yamal to the Blagopoluchiya bay (Novaya Zemlya) was studied to calculate the run-off contribution. Freshwater samples were collected from the glaciers (Rose, Serp i Molot) and from the Yenisei's and Ob's estuaries. The delta-values of hydrogen and oxygen of glacier waters are significantly higher than the delta-values of river waters. The isotope composition of Ob's estuarial waters is $\delta D = -131.4$ and $\delta^{18}O = -17.6$ ‰. Isotope composition of Yenisei's estuarial waters is bimodal. Both parameters which are close to the Ob's ones and more isotopically heavier (-120.7 и -15.8 ‰) were determined. For the section studied the two-component mixing of the fresh water component ($\delta D = -119.4$, $\delta^{18}O = -15.5$) and seawaters ($S = 34.9$, $\delta D = +1.56$, $\delta^{18}O = +0.25$) is determined. The seawater component is close to the Barents saline waters. Kara Sea along the section studied is freshened. The main source of the freshwaters is the riverine run-off. Calculations show that the main part of water body contains 5–10% of the freshwaters and at the depth more than 100 meters the freshwater contribution is less than 5%. The maximal contribution of the freshwaters (>65%) was detected at surface layer at the central part of the studied section.