

МОДИФИКАЦИЯ ОПРЕСНЕННЫХ ВОД НА ШЕЛЬФЕ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ: СВЯЗЬ ИЗОТОПНЫХ ПАРАМЕТРОВ И СОЛЕННОСТИ

© 2019 г. Е.О. Дубинина^{а,*}, А.Ю. Мирошников^а,
С.А. Коссова^а, С.А. Щука^б

^аИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН
Россия, 119017 Москва, Старомонетный переулок, 35

^бИнститут океанологии им. П.П. Ширшова РАН
Россия, 117997 Москва, Нахимовский проспект, 36

*e-mail: elenadelta@gmail.com

Поступила в редакцию 14.05.2018 г.

После доработки 20.05.2018 г.

Принята к публикации 05.06.2018 г.

Работа посвящена проблеме оценки вклада вод речного стока в морские воды Арктического шельфа, где на фоне опреснения интенсивно протекают процессы замерзания и таяния опресненных вод. Предложена модель смешения-модификации вод, которая учитывает формирование морского льда из опресненных вод на шельфе. Модель применена для интерпретации данных, полученных по материалам 63 и 69 рейсов НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2015 и 2017 гг.).

Для вод шельфа моря Лаптевых в районе исследований установлено два источника водных масс — атлантических вод и вод реки Лены. Однако воды в данной зоне шельфа модифицированы, т.е. имеют более высокую соленость, чем та, которая соответствует смешению двух установленных компонентов. Присутствие модифицированных вод, поступающих с шельфа моря Лаптевых, прослеживается в зоне континентального склона. Опреснение в зоне континентального склона достигает 15–27% и затрагивает глубины не более 20 м, на глубинах более 50 м оно практически исчезает.

Для расчета доли речного стока в модифицированных водах предложена модель смешения-модификации. Полученные данные были использованы для расчета доли речных вод по предложенной модели и по общепринятой модели трехкомпонентного смешения, опубликованной в работе Ostlund, Nut (1984). Сравнение результатов, полученных для шельфа моря Лаптевых при расчетах по обеим моделям, показало, что применение модели трехкомпонентного смешения к модифицированным водам приводит к завышению оценок вклада речных вод, которое может достигать 20%. Предложен критерий, по которому каждый образец опресненных вод может быть отнесен к области применения либо модели смешения-модификации, либо модели трехкомпонентного смешения. При таком комплексном подходе расчеты будут освобождены от получения нереальных и отрицательных величин долей компонентов смеси, а также от завышенных оценок вклада речного компонента.

Ключевые слова: изотопы кислорода и водорода, соленость, морская вода, море Лаптевых, Лена, модифицированные воды, морской лед

DOI: 10.31857/S0016-752564113-19

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее актуальных проблем, связанных с состоянием вод Арктических акваторий, является их опреснение за счет мощного континентального стока, на долю которого приходится более 10% речных вод, поступающих в мировой океан (Dittmar, Kattner, 2003; Gordeev et al., 1996; Ekwurzel et al., 2001). Оценка дальности распространения вод речного стока на арктическом шельфе и за его пределами приобретает особую

актуальность в связи с малой изученностью динамики вод в пределах Северного Ледовитого океана (Aagard et al., 1989; Bauch, Schlosser, 1995; Dickson, Brown 1994; Jones et al., 1995; Mysak et al., 1993; Peterson, Whitworth III, 1989). Не менее актуальной является проблема модификации вод, вызванной формированием льда и повышением солености вод на арктическом шельфе. Поступление гиперсолёных морских вод в Евразийский бассейн влияет на структуру галоклина арктического океана, и наиболее ярко этот

процесс проявляется в море Лаптевых (Johnson, Polyakov, 2001).

Развитие современных методов изотопной геохимии позволяет использовать природные трассеры, такие как изотопный состав водорода и кислорода, в изучении динамики морских водных масс. Наиболее информативными изотопные методы становятся при совместном их применении с традиционно используемыми гидрофизическими параметрами, прежде всего соленостью. Имеющиеся на данный момент представления об изотопных параметрах атлантических вод, атмосферных осадков и стока крупных северных рек Евразии позволяют оценивать степень опреснения вод арктического шельфа. Пресные воды, поступающие с континента в арктические моря, характеризуются закономерным убыванием с запада на восток величин δD и $\delta^{18}O$ (Vauch et al., 2012; Vauch et al., 2005; Gordeev et al., 1996; Ostlund, Hut, 1984; Redfield, Friedman, 1969). Это связано с постепенным исчерпанием атлантических воздушных масс, переносящихся в восточном направлении над Евразийским континентом (Vauch et al., 2011; Brezgunov et al., 1983). Однако для Арктики осложняющим фактором в оценке параметров смешения морских и пресных вод, являются процессы формирования и таяния льда, которые приводят к сильным вариациям солености при умеренных изотопных сдвигах.

Потепление климата нарушает баланс процессов замерзания, таяния льда и речного стока с континента, что выводит на первый план актуальность оценок поступления континентальных вод в Арктический океан (Johnson, Polyakov, 2001; Vauch et al., 2016, и другие работы). Поскольку формирование опресненных водных масс происходит на шельфе, требуется точная оценка вклада отдельных источников опреснения, что требует учета процессов формирования льда.

Несмотря на то, что количественные оценки вклада различных источников опреснения крайне важны для понимания динамики опреснения арктических морей, имеющиеся подходы не отличаются разнообразием. С конца прошлого века в литературе доминирует модель смешения (Ostlund, Hut, 1984; Schlosser et al., 1994; Vauch et al., 1995) трех компонентов: глубинной атлантической воды, вод речного стока и талого морского льда. Для численного решения используется материальный баланс по солености и изотопному составу кислорода в каждом изученном образце воды. В результате вычисляются доли

трех крайних членов смешения, при этом их исходные характеристики (соленость и изотопный состав кислорода) должны быть известны (Ostlund, Hut, 1984; Vauch et al., 1995). Иногда к данной модели добавляется кластерный анализ, при котором отдельные водные массы характеризуются дополнительными характеристиками — содержанием N, Si, P (Vauch et al., 2018; Vauch et al., 2014).

Каждый из опресняющих компонентов для конкретного региона Арктики имеет свои уникальные изотопные параметры (Cooper et al., 2008; Vauch et al., 2010). В море Лаптевых наиболее мощным источником пресных вод является сток реки Лены (518 км³, Shiklomanov et al., 2018). Сезонный мониторинг мощности стока Лены представлен на сайте проекта Arctic Great Rivers Observatory (<https://arcticgreatrivers.org/>, Shiklomanov et al., 2018), там же опубликованы 52 определения величин $\delta^{18}O$ и δD за период 2004–2015 гг. для поверхностных и подледных вод Лены (<https://arcticgreatrivers.org/>, Holmes et al., 2018). Несмотря на ограниченное число изотопных определений, сезонные вариации величин $\delta^{18}O$ и δD поверхностных вод Лены воспроизводятся за 11 лет наблюдений так же, как воспроизводятся сезонные колебания мощности стока. Таким образом, применение постоянных изотопных характеристик речного стока вполне оправдано для расчета его вклада в формирование опресненных водных масс.

Для талого льда трудно задать постоянные изотопные параметры именно из-за того, что вклад опресняющих компонентов, контрастных по изотопному составу морской воде, не является постоянным ни в пространстве, ни во времени. Подход, связанный с принятием фиксированных изотопных параметров талого льда, особенно трудно применить к водам арктического шельфа, где градиенты солености и изотопного состава вод являются высокими, а замерзанию подвергается не чистая морская вода, а ее смесь с речными водами, резко варьирующая по солености и изотопным параметрам. Например, применение модели трехкомпонентного смешения к водам с соленостью, повышенной за счет замерзания, приводит к получению отрицательных величин доли талого льда. Иногда эти величины предлагается использовать как количественную меру вклада модифицированных вод (например, Vauch et al., 2013, 2014, и другие работы). Однако этот подход оправдан только в одном случае — когда замерзанию подвергается вода с постоянными изотопными

параметрами, и таяние льда происходит непосредственно в месте его формирования. Это условие может быть выполнено только в специфической обстановке, например, в зонах, удаленных от активного влияния речного стока и не испытывающих заметных поверхностных течений и перемешивания. Для зон перехода океан-континент такая обстановка нехарактерна, и модель трехкомпонентного смешения оказывается несостоятельной именно там, где оценка вклада речного стока наиболее актуальна.

В данной работе предложен подход, пригодный для количественных оценок процессов формирования льда и опреснения речным стоком для модифицированных вод Арктического шельфа. Проверка областей применимости разработанного подхода и модели трехкомпонентного смешения проведена путем анализа изотоп-

ных ($\delta^{18}\text{O}$ и δD) и гидрофизических (соленость, температура) параметров вод моря Лаптевых как в зоне активного опреснения стоком Лены, так и на континентальном склоне, где процессы опреснения и формирования льда имеют разную относительную интенсивность.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материал для изотопных исследований был отобран в ходе 63-го и 69-го арктических рейсов НИС «Академик Мстислав Келдыш». Станции 5215–5227 (63-й рейс, 2015 г.) расположены вдоль «Ленского» профиля, берущего начало от устья реки Лены и продолжающегося до континентального склона строго в меридиональном ($130^{\circ}30'$ ВД) направлении (рис. 1). Станции 5592–5596 (69-й рейс, 2017 г.) расположены в пределах центральной части того же профиля

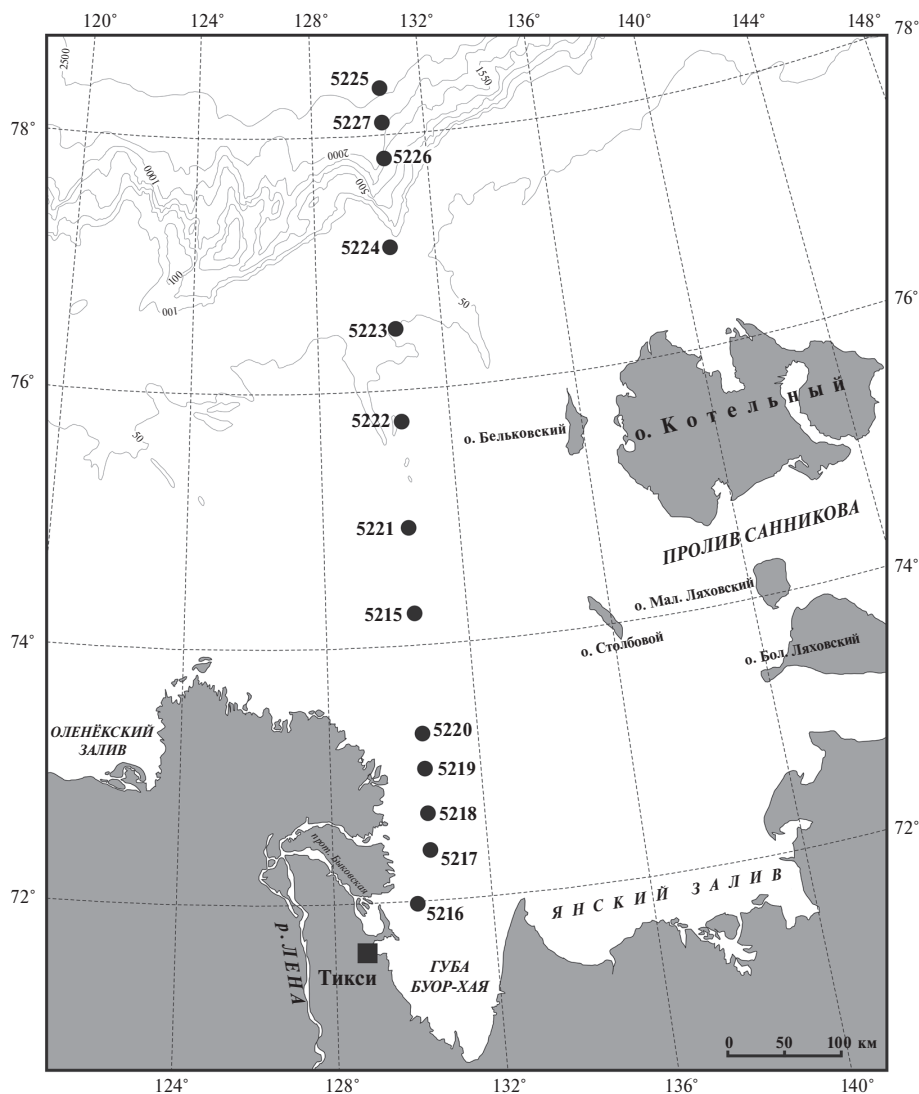


Рис. 1. Расположение станций на шельфе моря Лаптевых в 63-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш», 2015 г.

(рис. 2). Кроме станций, расположенных на шельфе моря Лаптевых, были изучены воды зоны континентального склона (станции 5225–5227, рис. 1). В настоящей работе приведены данные, полученные для верхних горизонтов (0–100 м) этих станций, т.е. на глубинах, сопоставимых с глубинами станций, расположенных на шельфе. Отбор проб воды проводился с помощью гидрофизического комплекса Rosette, снабженного батометрами Нискина. Для каждой станции изучался вертикальный профиль распределения гидрофизических параметров (соленость, температура) и величин δD и $\delta^{18}O$. Результаты определения солености и температуры воды изученных образцов приведены в табл. 1.

Изотопный анализ кислорода проведен методом изотопного уравнивания воды с CO_2 с использованием приборного комплекса

GasBench II и автосамплера PAL. Размер образца воды, температура и длительность реакции изотопного обмена составляли 0.5 см^3 , 32°C и 18 часов соответственно. Измерения изотопного состава кислорода в CO_2 проведены методом CF IRMS на масс-спектрометре DELTA V+. Поскольку анализировались пробы морских вод с соленостью, достигающей 3.5%, нами регулярно проводилась проверка влияния солевой нагрузки на результаты определения величины $\delta^{18}O$ (Truesdell, 1974; Horita et al., 1993a, 1993b). Для этого измерялся изотопный состав кислорода в опорных растворах NaCl, приготовленных в концентрациях от 0 до 20 масс. % из единой порции дистиллированной воды. Многократный анализ калибровочных серий показал отсутствие «солевого эффекта» для используемых нами условий анализа, метода и аппаратуры в области концентраций от 0 до 10%

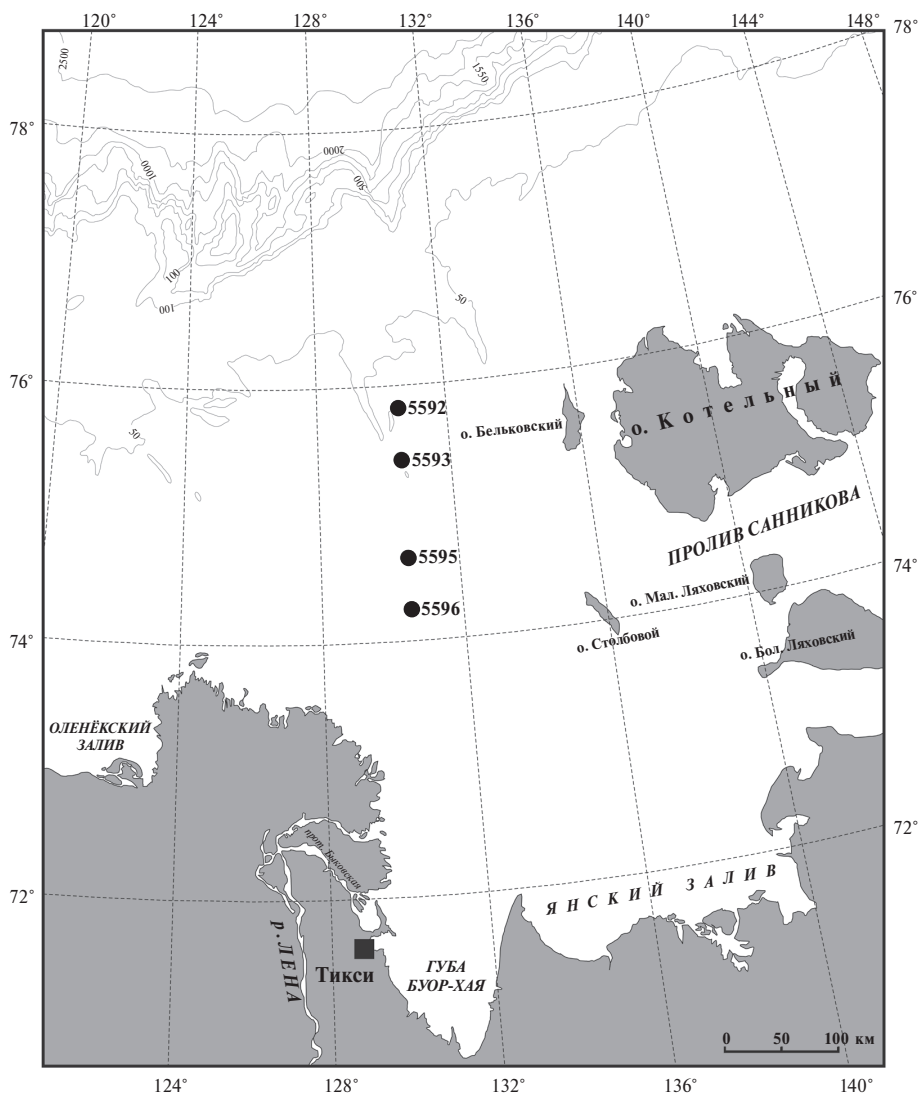


Рис. 2. Расположение станций на шельфе моря Лаптевых в 69-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш», 2017 г.

Таблица 1. Изотопный состав, соленость, температура вод шельфа моря Лаптевых и оценка вклада речных, талых вод и сформированного льда по моделям ТСМ и ММ

Станция	Горизонт, м	S	T, °C	$\delta D, ‰$	$\delta^{18}O, ‰$	ТСМ		ММ	
						f(m)	f(r)	x(i)	x(r)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Шельф моря Лаптевых, 63-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш», 2015 г.									
5215	0	21.129	3.52	-67.7	-8.85	-0.13	0.52	0.14	0.45
	5	21.831	3.31	-61.0	-7.83	-0.08	0.44	0.08	0.41
	10	28.774	0.63	-49.7	-6.42	-0.29	0.44	0.23	0.30
	16	33.657	-1.48	-20.6	-2.53	-0.18	0.20	0.12	0.12
	25	33.781	-1.53	-19.6	-2.27	-0.17	0.18	0.11	0.11
5216	0	2.722	8.36	-130.3	-17.15	0.11	0.82	-0.26	0.93
	3	14.205	6.47	-95.5	-12.67	-0.48	(1.04)	0.21	0.63
	6.2	27.073	1.44	-70.5	-8.92	-1.56	(1.65)	0.36	0.39
	8.6	29.391	-0.18	-36.1	-4.23	-0.46	0.58	0.10	0.22
5217	0.7	9.616	7.10	-110.5	-14.51	-0.14	0.85	0.17	0.74
	4.4	9.622	7.09	-104.5	-13.65	0.01	0.72	-0.01	0.72
	9.4	24.774	1.39	-45.7	-5.84	-0.09	0.37	0.04	0.31
5218	0	5.753	8.34	-121.5	-15.69	0.03	0.81	-0.05	0.83
	4	15.807	5.24	-87.8	-11.35	-0.23	0.76	0.13	0.58
	9	21.573	3.01	-63.9	-7.90	-0.17	0.54	0.07	0.41
	15.5	31.106	-0.47	-33.4	-4.07	-0.48	0.55	0.14	0.20
5219	0	7.844	7.65	-114.4	-14.80	-0.02	0.80	0.03	0.78
	4	13.365	5.99	-94.8	-12.42	-0.15	0.75	0.12	0.64
	8	17.486	4.43	-78.7	-9.97	-0.11	0.60	0.07	0.52
	15	30.934	-0.41	-35.6	-4.37	-0.44	0.52	0.16	0.21
	22	31.525	-0.49	-33.0	-4.07	-0.45	0.51	0.16	0.20
5220	0	17.728	5.07	-85.6	-11.12	-0.21	0.68	0.21	0.55
	5	17.751	5.07	-84.9	-11.08	-0.20	0.68	0.21	0.55
	10	17.854	5.03	-84.6	-11.12	-0.21	0.69	0.22	0.55
	21.5	31.617	-0.62	-32.3	-4.07	-0.27	0.34	0.16	0.20
5221	0	16.044	4.35	-89.5	-11.65	-0.17	0.70	0.19	0.58
	7	18.550	3.81	-79.5	-10.31	-0.18	0.63	0.17	0.52
	15	29.027	0.74	-39.7	-4.90	-0.22	0.37	0.13	0.25
	25	34.272	-1.75	-20.6	-2.51	-0.28	0.27	0.14	0.12
	34	34.310	-1.75	-21.0	-2.63	-0.30	0.29	0.15	0.12
5222	0	15.938	3.75	-91.3	-12.08	-0.23	0.75	0.23	0.59
	8	15.918	3.74	-90.5	-11.77	-0.19	0.72	0.19	0.59
	10	16.007	3.73	-90.1	-11.60	-0.17	0.70	0.18	0.58
	12	17.498	3.27	-80.0	-10.47	-0.14	0.62	0.13	0.54
	25	33.617	-1.72	-14.3	-1.64	-0.14	0.17	0.07	0.09
	35	33.660	-1.73	-14.1	-1.70	-0.15	0.18	0.07	0.09
	45	33.986	-1.75	-15.6	-1.63	-0.17	0.18	0.08	0.08

Таблица 1. (Продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5223	0	20.611	3.68	-72.3	-9.50	-0.17	0.57	0.18	0.47
	5	20.635	3.70	-70.5	-9.27	-0.15	0.55	0.16	0.47
	13	20.923	3.73	-69.9	-9.21	-0.16	0.55	0.17	0.46
	20	33.015	-0.89	-12.4	-1.56	-0.07	0.12	0.05	0.09
	35	33.837	-1.72	-7.0	-0.91	-0.05	0.08	0.03	0.06
	55	33.853	-1.73	-6.3	-0.71	-0.03	0.06	0.02	0.05
5224	0	22.021	3.57	-61.0	-7.84	-0.08	0.44	0.09	0.41
	4	23.581	3.52	-57.9	-7.49	-0.12	0.44	0.13	0.38
	15	26.656	3.01	-42.8	-5.59	-0.10	0.33	0.10	0.29
	20	33.228	-0.90	-9.2	-1.11	-0.03	0.08	0.03	0.07
	40	34.005	-1.54	-3.8	-0.38	-0.01	0.04	0.01	0.03
	58	34.010	-1.51	-3.5	-0.46	-0.02	0.04	0.01	0.04
Шельф моря Лаптевых, 69-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш», 2017 г.									
5592	0	25.735	2.09	-38.0	-4.82	0.00	0.26	0.00	0.26
	10	26.096	1.89	-36.8	-4.64	0.00	0.25	0.00	0.25
	20	31.643	-1.25	-14.4	-1.63	0.00	0.10	0.01	0.10
	32	33.372	-1.58	-6.7	-0.52	0.01	0.04	0.00	0.04
	44	33.753	-1.66	-5.5	-0.47	0.00	0.04	0.01	0.04
5592_2	0	18.04	2.11	-75.73	-9.88	-0.07	0.55	0.08	0.51
	5	24.90	2.34	-44.30	-5.62	-0.03	0.32	0.03	0.30
	11	25.55	2.34	-38.46	-4.96	0.00	0.27	0.00	0.27
	20	31.49	-1.27	-19.39	-2.33	-0.06	0.16	0.04	0.13
	35	33.78	-1.68	-5.94	-0.51	-0.01	0.04	0.01	0.04
	44	33.79	-1.68	-5.32	-0.50	-0.01	0.04	0.01	0.04
5593_2	0	16.19	2.58	-86.46	-11.12	-0.10	0.63	0.12	0.57
	5	19.27	2.75	-76.40	-9.75	-0.13	0.58	0.13	0.50
	8	24.85	2.49	-49.51	-6.27	-0.09	0.38	0.07	0.33
	15	26.54	1.05	-37.13	-4.67	-0.03	0.27	0.02	0.25
	35	33.70	-1.64	-6.14	-0.46	0.00	0.04	0.00	0.04
	44	33.76	-1.71	-8.58	-0.58	-0.02	0.05	0.01	0.04
5595_2	0	7.88	3.78	-117.64	-15.24	-0.09	0.86	0.14	0.78
	5	14.66	4.16	-82.85	-10.57	0.05	0.53	-0.04	0.57
	8	20.49	4.24	-61.53	-7.73	0.00	0.42	0.00	0.41
	20	31.92	-1.19	-14.57	-1.47	-0.01	0.10	0.00	0.09
	26	31.97	-1.19	-14.20	-1.48	-0.01	0.10	0.01	0.09
5596	0	21.81	3.94	-59.57	-7.59	-0.04	0.42	0.05	0.40
	4	21.87	3.88	-58.28	-7.35	-0.03	0.40	0.03	0.39
	8	22.15	3.54	-49.88	-6.30	0.03	0.33	-0.04	0.35
	17	32.15	-1.24	-14.04	-1.56	-0.02	0.10	0.02	0.09
	22	32.55	-1.31	-10.20	-0.86	0.01	0.05	-0.01	0.06

Таблица 1. (Окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5596_2	0	6.62	4.57	-123.63	-15.99	-0.11	0.92	0.18	0.81
	5	7.61	4.58	-113.56	-14.83	0.00	0.79	0.01	0.78
	8	16.44	4.23	-75.18	-9.64	0.05	0.48	-0.03	0.52
	15	30.13	-0.96	-21.71	-2.72	-0.06	0.19	0.02	0.15
	23	31.61	-1.13	-14.84	-1.67	-0.01	0.11	0.01	0.10
Континентальный склон моря Лаптевых, 63-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш», 2015 г.									
5225	0	30.146	2.00	-21.7	-2.75	-0.02	0.16	0.02	0.15
	10	30.147	2.00	-20.3	-2.52	-0.01	0.14	0.01	0.14
	15	30.891	1.49	-16.3	-2.05	0.00	0.12	0.01	0.12
	24	33.530	-1.55	-7.9	-0.67	-0.01	0.05	0.01	0.05
	35	34.052	-1.69	-5.3	-0.50	-0.01	0.04	0.02	0.04
	50	34.339	-1.65	-2.6	0.25	0.02	0.00	-0.02	0.00
	100	34.555	-0.79	-0.3	0.23	0.01	0.00	-0.01	0.00
5226	0	26.827	3.05	-40.4	-4.98	-0.05	0.28	0.05	0.26
	12	26.983	3.03	-40.3	-5.11	-0.06	0.29	0.07	0.27
	20	31.839	1.66	-13.3	-1.40	0.00	0.09	0.00	0.09
	35	33.580	-1.17	-5.7	-0.40	0.01	0.03	0.00	0.03
	50	34.032	-1.20	-3.1	-0.18	0.00	0.02	0.00	0.02
	100	34.497	-1.25	-0.7	0.35	0.02	-0.01	-0.02	0.00
5227	0	28.352	2.79	-30.2	-3.69	-0.02	0.21	0.02	0.20
	12	29.226	2.38	-27.0	-3.42	-0.03	0.19	0.03	0.19
	18	30.886	1.74	-19.4	-2.48	-0.03	0.14	0.03	0.14
	32	33.316	-1.02	-6.4	-0.45	0.01	0.04	-0.01	0.04
	50	34.221	-1.28	-2.6	-0.05	0.00	0.02	0.00	0.02
	80	34.401	-1.48	-1.6	-0.05	0.00	0.02	0.00	0.02

включительно, что надежно перекрывает область солености изучаемых морских вод.

Изотопный анализ водорода проведен методом DI IRMS с использованием масс-спектрометра DELTAplus. Разложение микрообразцов (0.001 см³) водных проб с выделением из них водорода проводилось на горячем (800°C) хrome. Величины δD и $\delta^{18}O$, приведенные в международной шкале V-SMOW, получены калибровкой относительно международных стандартов V-SMOW и V-SLAP. Точность определения величин $\delta^{18}O$ и δD составила ± 0.1 и ± 0.3 ‰ соответственно. Результаты определения изотопного состава водорода и кислорода воды изученных образцов приведены в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изотопный состав кислорода и водорода вод шельфа моря Лаптевых показывает черты, характерные для двухкомпонентного смешения. В масштабе диаграммы $\delta^{18}O$ - δD (рис. 3) все точки, полученные для вод шельфа, лежат на линии смешения двух компонентов — вод реки Лены и доминирующих в регионе атлантических водных масс, модифицированных в Баренцевом море (Frew et al., 2000; Bauch et al., 2012, 2014, и другие работы). Изотопные параметры атлантических вод были установлены на основе детального изучения гомогенных вод Баренцева моря (Дубинина и др., 2017а, 2017б). Изотопные параметры речного стока можно

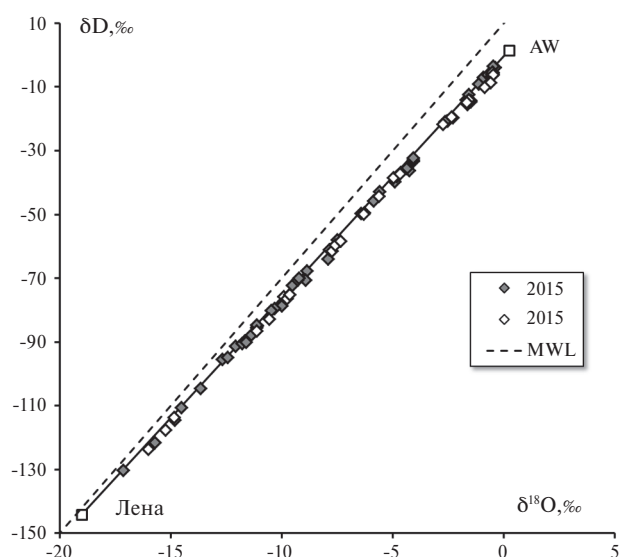


Рис. 3. Воды шельфа моря Лаптевых на $\delta^{18}\text{O}$ - δD диаграмме. Пунктир (MWL) — линия метеорных вод Крейга (Craig, 1961), AW и «Лена» — параметры Атлантических вод и речного стока Лены (Дубинина и др., 2017).

оценивать двумя способами. Первый — с использованием сезонного мониторинга величин $\delta^{18}\text{O}$, δD и мощности стока реки, второй — методом экстраполяции изотопных характеристик опресненных морских вод на нулевую соленость. Средневзвешенные величины $\delta^{18}\text{O}$ и δD , рассчитанные по данным, представленным на сайте Arctic Great Rivers Observatory (Holmes et al., 2018), составляют -20.3 и -154 ‰ соответственно. Однако эта оценка приближительна, поскольку изотопные данные, размещенные на данном сайте, были получены только для поверхностных и подледных вод реки, которые не всегда соответствуют параметрам всего объема речных вод, поступающих в море. Для балансовых расчетов более удобен подход, при котором изотопные характеристики опресненных морских вод экстраполируют на нулевую соленость, т.е. используется природное усреднение изотопных параметров. Этим методом получены оценки величин $\delta^{18}\text{O}$ и δD эстуарных вод Лены по материалам, отобраным в 2015 году (-19 и -144 ‰ соответственно, Дубинина и др., 2017). Установленная величина $\delta^{18}\text{O}$ оказалась близка к оценкам, проведенным в другие годы (Letolle et al., 1993; Mueller-Lupp et al., 2003; Bauch et al., 2010).

Положение точек вод, отобранных в разные годы, вдоль единой линии смешения (диаграмма на рис. 3) указывает на постоянство усредненных изотопных параметров речного стока Лены во времени. Возможно, что это связано

с преобладанием весенне-летнего стока (июнь-сентябрь) и близким сезоном проведения рейсов (август), в результате чего усредненные эстуарные воды Лены показывают примерно один и тот же изотопный состав кислорода и водорода в разные годы. Наклон линии смешения на $\delta^{18}\text{O}$ - δD диаграмме составляет 7.56, что очень близко к наклону линии, контролируемой равновесным замерзанием и таянием (7.28 согласно отношению коэффициентов фракционирования изотопов кислорода и водорода в системе лед-вода; Lehmann and Siegenthaler, 1991). Следовательно, надежно отличить и учесть процессы формирования льда в изотопных координатах $\delta^{18}\text{O}$ - δD не представляется возможным.

На процесс двухкомпонентного смешения в зоне шельфа моря Лаптевых указывает также поведение двух основных гидрофизических параметров — температуры и солености вод (рис. 4), поскольку для TS -кривых на данной диаграмме не наблюдается ярко выраженных экстремумов и перегибов (Мамаев, 1987). Можно отметить пониженную температуру опресняющих вод, отобранных в 2017 году в верхних горизонтах (0–5 м) станций 5592_2, 5593_2, 5595_2 и 5596_2. Возможно, это связано с разницей во времени отбора проб, который проводился в середине сентября в 2017 году. Для вод, отобранных в начале сентября 2015 года и в 2017 году (ст. 5592 и 5596) подобного понижения температуры не наблюдалось.

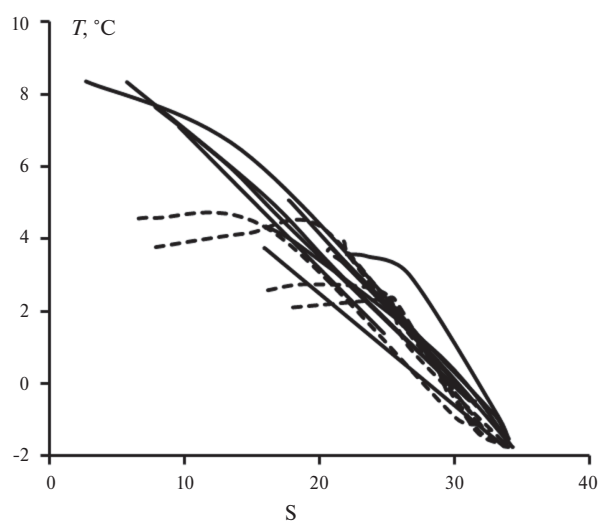


Рис. 4. Связь температуры и солености вод на шельфе моря Лаптевых: сплошные линии — данные рейса 2015 года (ст. 5215–5224), пунктир — данные рейса 2017 года (ст. 5592–5596).

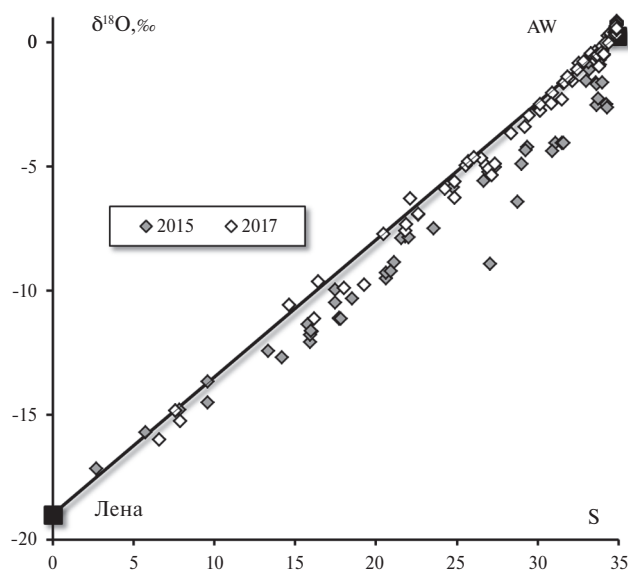


Рис. 5. Связь изотопного состава кислорода и солености вод на шельфе моря Лаптевых по материалам экспедиций 2015 и 2017 гг. Изотопные параметры Атлантических вод и речного стока Лены приведены согласно работе (Дубинина и др., 2017).

Таким образом, изолированное рассмотрение изотопных (δD и $\delta^{18}O$) и гидрофизических (T и S) параметров не позволяет идентифицировать процессы формирования или таяния льда в изученных водах шельфа моря Лаптевых. Однако совместное их рассмотрение на диаграмме «изотопный состав-соленость» показывает, что эти процессы не только имели место, но и играли большую роль в формировании изотопного и гидрофизического облика данных вод. На рис. 5 показано соотношение величин $\delta^{18}O$ с соленостью для всех изученных образцов вод шельфа моря Лаптевых за 2 года наблюдений (связь солености и величин δD является аналогичной, поэтому имеет смысл рассматривать только одну диаграмму). Аналогичная картина была установлена для моря Лаптевых и в другие годы наблюдений, например с 2007 по 2011 гг. (Thibodeau et al., 2014). Как и в случае изотопной $\delta^{18}O$ - δD диаграммы (рис. 3), нет сомнений в природе и стабильности усредненных изотопных характеристик крайних членов смешения. Однако, несмотря на это, полученные данные не группируются вдоль идеальной линии смешения в координатах «изотопный состав-соленость» (« δ - S ») и показывают заметный разброс, более явно выраженный для данных, полученных по результатам отбора в 2015 году.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Характерной чертой процессов замерзания и таяния морского льда является малая величина изотопного эффекта по сравнению с изменением солености, что выражается почти горизонтальными сдвигами в координатах « δ - S » (Craig, Gordon, 1965) и возникновением разброса относительно линии двухкомпонентного смешения. Это связано с тем, что лед имеет низкую соленость (в среднем около 3–4 промилле согласно Cox, Weeks, 1974; Greiwank, Notz, 2015) и обогащен изотопами ^{18}O и D в равновесии с водой ($10^3 \text{Ln}\alpha$ (лед-вода) для $\delta^{18}O$ и δD составляют 2.9 и 21.1‰ соответственно, Lehmann and Siegenthaler, 1991). Вклад в водную массу талого льда приводит к трансформации связи изотопного состава с соленостью в сторону отклонения составов влево и вверх от линии смешения в координатах « δ - S ». Модификация вод за счет формирования и удаления льда приводит к отклонению составов вправо и вниз от линии смешения. Практически все составы вод, отобранных на шельфе моря Лаптевых в зоне влияния стока Лены, отклоняются вправо и вниз от линии смешения атлантических вод с водами Лены в координатах « δ - S » (рис. 5).

Существующая модель оценки параметров смешения речных (r), талых (m) и морских атлантических (aw) вод основана на решении уравнений материального баланса по солености и изотопному составу кислорода воды (Ostlund, Nut, 1984). Трансформация связи δ - S за счет вклада талого льда учитывается через присутствие третьего компонента, $f(m)$, при этом сумма долей каждого из компонентов равна единице:

$$f(r) + f(aw) + f(m) = 1. \quad (1)$$

Для количественных оценок величин $f(r)$, $f(aw)$ и $f(m)$ принимаются конкретные изотопные параметры для морских и речных вод, а также талого компонента. Приближение модели к интерпретации опресненных вод может быть реализовано через расчет изотопных параметров талого льда относительно поверхностных вод каждой станции с учетом коэффициента фракционирования (как это сделано в настоящей работе). Однако учесть по данной модели модификацию вод за счет формирования и выноса льда крайне сложно. Например, предлагалось рассматривать отрицательные величины $f(m)$, закономерно возникающие при расчете, как долю модифицированных вод (Bauch et al., 2014; Bauch, Cherniavskaia, 2018). Как и

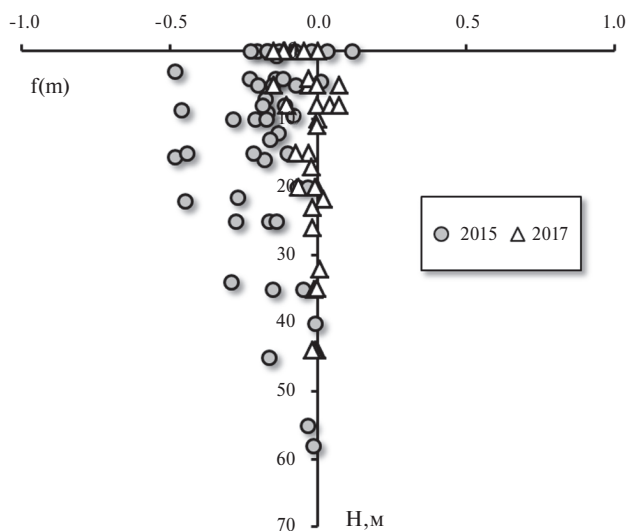


Рис. 6. Расчет доли талого льда по модели трехкомпонентного смешения (ТСМ, Ostlund, Nut, 1984) для вод шельфа моря Лаптевых.

ожидалось, почти все величины $f(m)$, рассчитанные по модели трехкомпонентного смешения (ТСМ, Three Component Mixing) для образцов вод шельфа, являются отрицательными (рис. 6). Согласно этим величинам, доля модифицированных вод в отдельных районах шельфа достигала 50% в 2015 году ($f(m) = 0.5$) и в целом была заметно меньше в 2017 году. Также из расчета следует, что формирование льда наиболее сильно затрагивает верхние горизонты морских вод шельфа (рис. 6).

Однако подход с использованием отрицательных величин $f(m)$ приводит к ошибочным оценкам доли речных вод, поскольку отрицательные величины $f(m)$ требуют возрастания доли остальных компонентов для соблюдения баланса (1). Следовательно, для модифицированных вод Арктического шельфа, имеющих отчетливую трансформацию связи изотопных параметров с соленостью, необходим подход, который корректно учитывает долю сформированного льда и, следовательно, дает корректную оценку доли речных вод.

Модель смешения-модификации вод (ММ)

Модель смешения-модификации (ММ, Mixing and Modification) разработана как альтернатива модели трехкомпонентного смешения специально для вод, соленость и изотопный состав которых модифицированы в процессах замерзания. Эта модель наиболее актуальна для Арктического шельфа, где одновременно активно проявлены процессы формирования льда

и опреснения континентальным стоком. Аналогично модели трехкомпонентного смешения (ТСМ), модель ММ позволяет для каждого образца воды с известной соленостью и изотопным составом кислорода (или водорода) рассчитать долю сформированного льда, а также пропорцию смешения морских вод с пресными, например, речными водами. При разработке модели было принято допущение о том, что процессы испарения незначительно влияют на соленость и изотопные параметры морской воды по сравнению с ее опреснением и формированием льда. Основным отличием ММ от ТСМ является условие, состоящее в том, что замерзанию подвергаются опресненные воды с переменными соленостью и изотопными параметрами. Модель опирается на два балансовых уравнения, первым из которых является баланс солености:

$$S^0 = x(i) \cdot S^i + [1 - x(i)] \cdot S^{SA}, \quad (2)$$

где S^i – соленость сформированного льда, S^0 и S^{SA} – соленость воды до и после замерзания, а $x(i)$ – доля сформированного льда из данной порции воды. При этом величина S^{SA} отвечает солености, измеренной в исследуемом образце воды.

Изменение солености на фоне слабого изотопного сдвига трактуется либо в пользу присутствия талого компонента, либо в пользу формирования льда из конкретной порции воды с последующим его удалением (Craig, Gordon, 1965). В первом случае происходит избыточное «опреснение», а во втором – избыточное «осолонение» воды относительно идеального двухкомпонентного смешения. Таким образом, основным критерием, который позволяет отнести каждый случай либо к формированию, либо к таянию льда, служит направление трансформации связи «изотопный состав-соленость», для чего реальную соленость образца воды (S^{SA}) можно сравнить с теоретической соленостью (S^0), которая отвечает простому двухкомпонентному смешению:

$$S^0 = \left[\frac{\delta^{SA} - \delta^r}{k} \right], \quad (3)$$

где δ^{SA} и δ^r – изотопный состав кислорода (водорода), и образца речной воды соответственно, а k – угловой коэффициент линии смешения речных и атлантических вод в координатах «изотопный состав-соленость». Свободный член данной линии должен соответствовать величине δ^r . Соленость льда (S^i) можно задать через линейную связь с соленостью образца, т.е. воды, из которой этот лед сформировался:

$$S^i = S \cdot \left[\frac{S^{si}}{S^{aw}} \right], \quad (4)$$

где S^{aw} и S^{si} – соленость атлантических вод и морского льда соответственно.

Материальный баланс по солености позволяет рассчитать долю сформированного (талого) льда:

$$x^i = \frac{[S^0 - S^{SA}]}{[S^i - S^{SA}]}. \quad (5)$$

Знаменатель дроби в данном уравнении всегда отрицателен, поэтому знак величины $x(i)$ определяется соотношением реальной и теоретической солености образца. Для вод, испытавших формирование льда и его удаление, величина $x(i)$ является положительной, а для вод, дополнительно опресненных талым компонентом ($S < S^0$), величина $x(i)$ является отрицательной. Безусловно, существует неопределенность, связанная с интерпретацией отрицательных величин $x(i)$ в качестве доли талого компонента. Во-первых, талый компонент необязательно соответствует тому образцу воды, который рассматривается. Лед может быть привнесен в систему и имеет право существенно отличаться по изотопным параметрам от льда, который формируется *in situ*. Во-вторых, балансовое уравнение для солености в случае участия талого льда (т.е. третьего компонента) должно соответствовать модели трехкомпонентного смешения, т.е. отличаться от уравнения (2). Поэтому к использованию отрицательных оценок величины $x(i)$ в данной модели (так же как к использованию отрицательных величин $f(m)$ в модели трехкомпонентного смешения) необходимо относиться с большой осторожностью. В качестве компромисса можно предложить подход, когда образцы с отрицательными величинами $x(i)$ интерпретируются отдельно в рамках модели трехкомпонентного смешения (Ostlund, Nut, 1984), тем более что эти образцы всегда дают положительные значения величин $f(m)$ в модели ТСМ. При положительных значениях $x(i)$ можно корректно рассчитать долю сформированного льда по уравнениям (3)–(5), необходимую для дальнейших расчетов доли речных вод. Таким образом, знак параметра $x(i)$ показывает направление трансформации связи «изотопный состав-соленость» и является критерием в выборе подходящей модели для расчета.

Во втором уравнении материального баланса фигурируют изотопные параметры. Аналогично балансу солености (2), принимается, что до

формирования льда изотопный состав кислорода (или водорода) образца воды соответствовал величине δ^0 . После формирования порции льда с усредненной величиной δ^i и его выноса за пределы рассматриваемой системы остается вода, имеющая величину δ^{SA} , (т.е. величину δ^{18O} или δD изученного образца):

$$\delta^0 = \delta^{SA} \cdot [1 - x(i)] + \delta^i \cdot x(i), \quad (6)$$

где $x(i)$ – доля сформированного льда в порции исходной воды, рассчитанная по балансу солености (2).

Для наиболее простого случая можно считать, что формирование льда происходит в изотопном равновесии со всей оставшейся порцией воды, хотя на данной стадии не исключен процесс Релевской дистилляции. Изотопный состав сформированного льда можно выразить через сумму:

$$\delta^i = \delta^{SA} + \Delta(i-w), \quad (7)$$

где $\Delta(i-w)$ – равновесный коэффициент фракционирования в системе «лед-вода». Уравнения (6) и (7) позволяют найти исходный изотопный состав кислорода (или водорода) образца воды до его замерзания:

$$\delta^0 = \delta^{SA} + \frac{x(i) \cdot \Delta(i-w)}{1 - x(i)}. \quad (8)$$

Величина δ^0 , вычисленная по уравнению (8), соответствует положению точки образца на линии идеального двухкомпонентного смешения речных и атлантических вод в координатах «изотопный состав-соленость». Нахождение пропорций смешивающихся компонентов сводится к решению материального баланса относительно величины δ^0 :

$$\delta^r \cdot (x)r + \delta^{aw} \cdot (1 - (x)r) = \delta^0, \quad (9)$$

где δ^r и δ^{sw} – изотопный состав кислорода (водорода) крайних членов смешения, а величина $x(r)$ – доля речной воды в двухкомпонентной смеси. Доля неопресненных атлантических вод в этой смеси составляет:

$$x(aw) = 1 - (x)r. \quad (10)$$

Необходимо обратить внимание, что в данной модели сумма долей сформированного льда, морской и речной воды не равна единице:

$$x(i) + (x)r + x(sw) \neq 1, \quad (11)$$

что ее отличает от модели ТСМ, в основе которой лежит равенство (1).

Применение модели ММ к водам шельфа моря Лаптевых

Для применения модели необходимо задать изотопные характеристики и соленость крайних членов смешения, соленость морского льда, а также коэффициент фракционирования изотопов кислорода (водорода) в системе «лед-вода». Для всех расчетов, проведенных в данной работе, были использованы исходные данные, приведенные в табл. 2. Расчет по модели ММ показал, что в водах, отобранных через всю зону шельфа – от устья Лены до континентального склона, резко преобладают положительные величины $x(i)$ (рис. 7а). Максимально сильный эффект, связанный с формированием льда, проявлен в пределах верхних (0–20 м) горизонтов вод шельфа. На глубинах более 50 м данный эффект нивелирован. В отличие от оценок по модели ТСМ, согласно которым доля сформированного льда достигает 50% (рис. 6), полученные оценки доли сформированного льда по модели ММ не превышают 20–22% ($x(i) = 0.21–0.22$), и только одна оценка составила 36% ($x(i) = 0.36$). Для многих станций положительные величины $x(i)$ прослеживаются по всей толще вод – от поверхности до дна, что говорит о высокой степени модифицированности вод шельфа моря Лаптевых за счет формирования и выноса льда. Кроме того, можно отметить более эффективную моди-

фикацию вод шельфа в 2015 году по сравнению с 2017 годом.

Полученные оценки интересно сопоставить с расчетом для верхних горизонтов (0–100 м) станций 5225–5227, чтобы оценить возможность поступления модифицированных вод с шельфа через зону континентального склона в Евразийский бассейн Северного Ледовитого океана. На рис. 7б видно, что воды с положительными величинами $x(i)$ присутствуют в верхних горизонтах вод континентального склона и распространяются на глубинах, не превышающих средние глубины шельфа моря Лаптевых. Абсолютное значение величины $x(i) \approx 0.02$ в зоне континентального склона примерно в 10 раз ниже, чем на шельфе, а максимальная величина $x(i) = 0.7$ установлена в водах станции 5226, расположенной на границе шельфа и континентального склона. Таким образом, несмотря на существенное разбавление модифицированных вод шельфа, модель позволила обнаружить их характерный сигнал в верхних горизонтах станций 5225–5227. Этот результат поддерживается данными по изотопному составу неодима и содержанию редкоземельных элементов в водах моря Лаптевых (Laukert et al., 2017).

Согласно расчету по модели ММ, верхние горизонты (выше 20 м) вод на континентальном склоне содержат до 15–27% пресного

Таблица 2. Параметры, принятые для расчетов по моделям ММ и ТСМ

Параметр	Обозначения	Единицы измерения	Величина	Источник
Соленость морского льда	S (si)	е.п.с.	4 (средняя)	Cox, Weeks, 1974, Greiwank, Notz, 2015
Соленость атлантических вод в регионе	S (aw)	е.п.с.	34.95	Дубинина и др., 2017
Соленость речных вод	S (r)	е.п.с.	0	
Изотопный состав кислорода (водорода) атлантических вод в регионе	δ (aw)	‰	0.26 (1.56)	Дубинина и др., 2017
Изотопный состав кислорода (водорода) вод р. Лены	δ (r)	‰	-19 (-144)	Дубинина и др., 2017
Коэффициент фракционирования изотопов кислорода (водорода) в системе «лед-вода»	1000 Ln α	‰	2.9 (21.1)	Lehmann, Siegenthaler, 1991

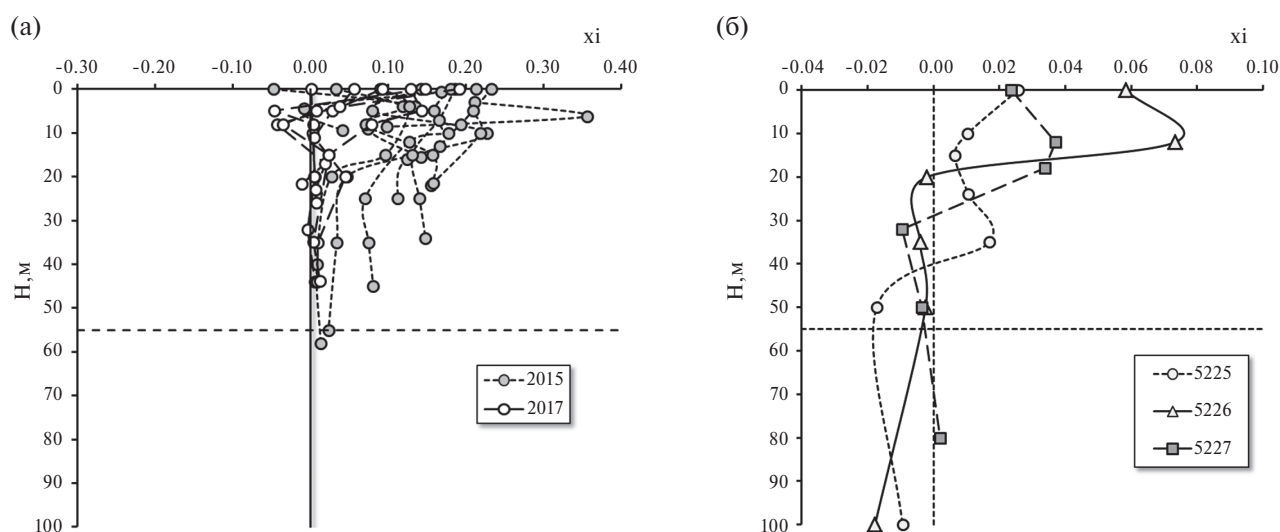


Рис. 7. Доля сформированного и удаленного льда, рассчитанная по модели смешения-модификации (ММ) для вод шельфа моря Лаптевых (а), для верхних горизонтов вод континентального склона моря Лаптевых (б).

компонента с изотопными параметрами, близкими к параметрам реки Лены (рис. 8). Содержание опресняющего компонента резко убывает и к 40–50-метровым глубинам не превышает одного процента. Характерно, что степень опреснения поверхностных вод быстро падает и в направлении от шельфа к открытому океану, что поддерживает предположение о поступлении опресняющего компонента с шельфа моря Лаптевых.

Рассчитанные пропорции смешения речных и морских вод на шельфе единообразно распределены по глубине (рис. 9а). В общем тренде находятся все точки изученных станций, несмотря на разные годы отбора и разную степень проявления процессов формирования льда, которые в 2015 г. были выражены сильнее, чем в 2017 г. (рис. 7а). На поверхности доля речных вод достигает 40–80% и резко снижается до 10% на глубинах около 20 м. Примерно такие же закономерности вертикального распределения речных вод наблюдались нами в Карском море (Дубинина и др., 2017а, 2017б).

Расчет доли речных вод Лены по модели ТСМ (рис. 9б) показывает, что полученные величины $f(r)$ несвободны от влияния процессов формирования льда, вследствие чего данные для образцов, отобранных в 2015 и 2017 годах, не лежат в рамках единого тренда. Оценки $f(r)$, проведенные по модели ТСМ, более разбросаны, особенно для 2015 года и в целом являются более высокими по сравнению с оценками по модели ММ.

Сравнение моделей ММ и ТСМ

Результаты оценок доли речных вод, полученных по моделям ММ и ТСМ (рис. 10) являются близкими в области низких долей речного стока. С ростом опреснения разница в оценках возрастает, причем оценки по модели ТСМ всегда более высокие, чем по модели ММ. Например, средние оценки вклада речных вод в воды шельфа для 81 изученной пробы различаются примерно на 10% — 43 и 34% для модели ТСМ и ММ соответственно. Причина этих различий

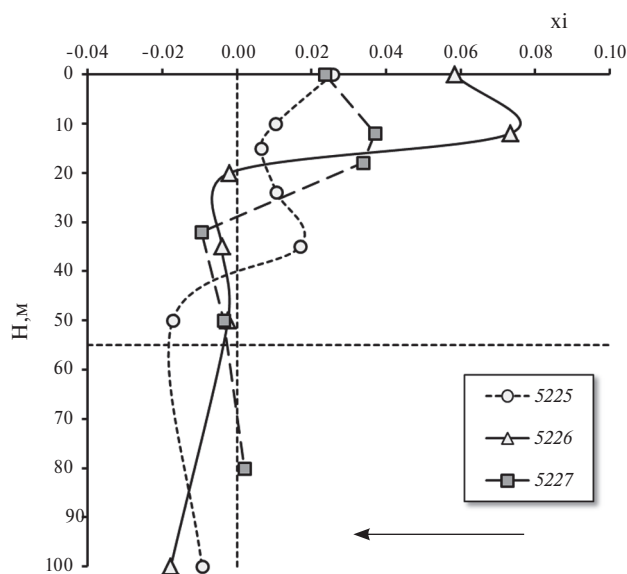


Рис. 8. Оценка доли пресного компонента с изотопными параметрами стока реки Лены в области континентального склона по модели ММ. Стрелка — направление на север от шельфа.

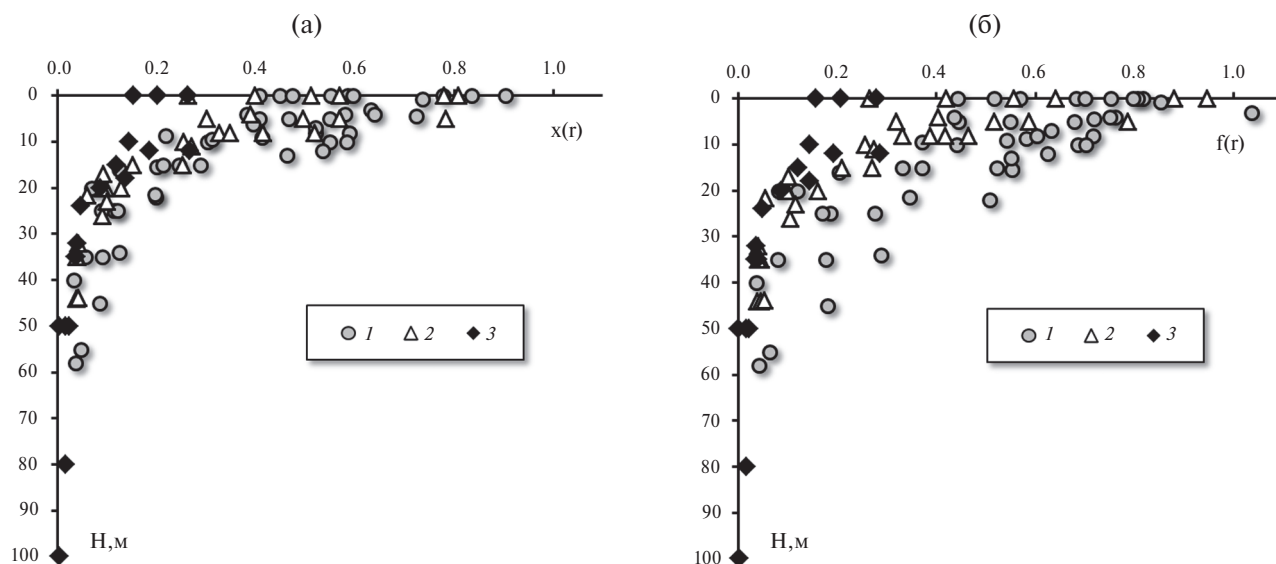


Рис. 9. Распределение доли речной воды в зависимости от глубины на шельфе моря Лаптевых: (а) – расчет по модели ММ, (б) – по модели ТСМ. Обозначения: 1 – образцы шельфовых вод, отобранные в 2015 г., 2 – образцы шельфовых вод, отобранные в 2017 г., 3 – образцы верхних горизонтов станций, расположенных в зоне континентального склона (5225–5227).

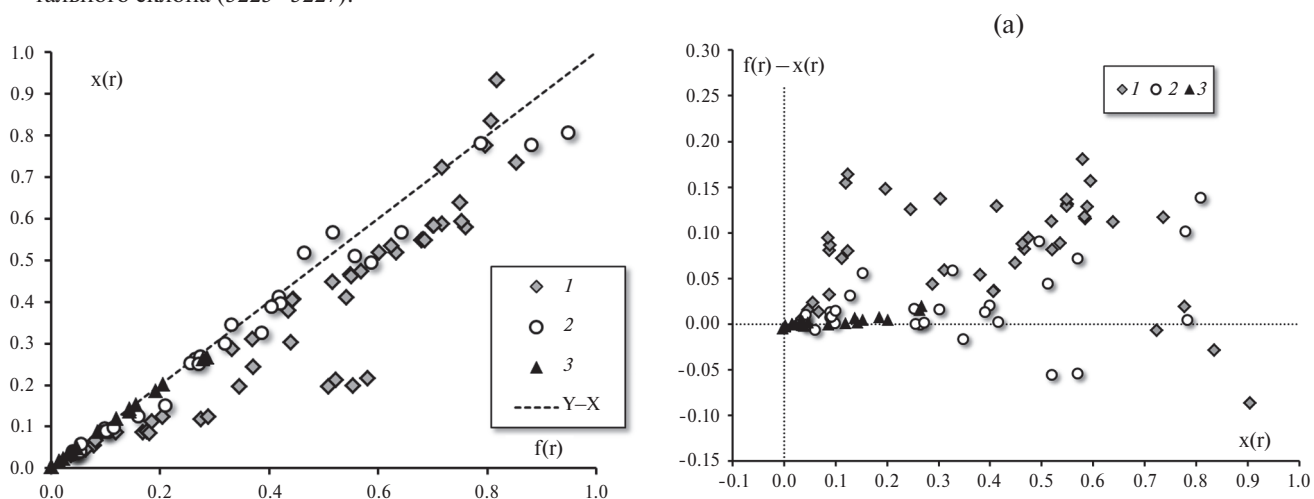


Рис. 10. Сравнение оценок доли речного стока для вод шельфа моря Лаптевых, полученных по моделям: $f(r)$ – трехкомпонентного смешения (ТСМ), $x(r)$ – модели смешения-модификации (ММ). Обозначения: 1 – образцы шельфовых вод, отобранные в 2015 г., 2 – образцы шельфовых вод, отобранные в 2017 г., 3 – образцы верхних горизонтов станций, расположенных в зоне континентального склона (5225–5227).

лежит в разном подходе к учету процессов модификации вод, что следует из сравнительных диаграмм (рис. 11а, 11б). Расхождение оценок доли речных вод ($f(r)-x(r)$) отложено от доли речного компонента ($x(r)$) и доли сформированного льда ($x(i)$), и отчетливая зависимость различия в оценках наблюдается только в последнем случае (рис. 11б).

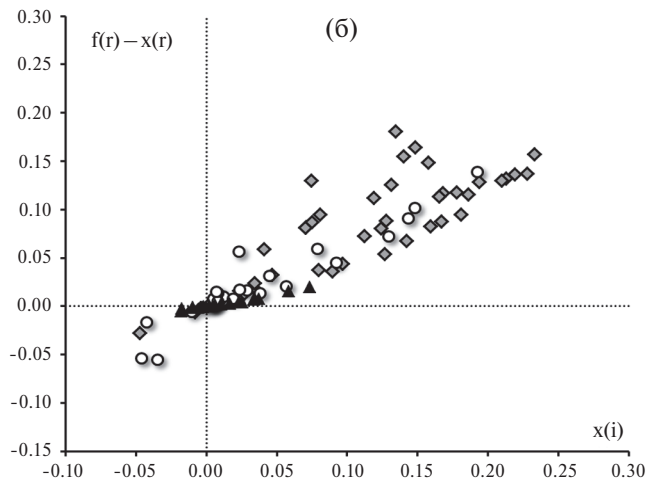


Рис. 11. Зависимость расхождения оценок вклада речного стока между моделями ТСМ и ММ от доли речного стока (а) и доли сформированного льда (б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные для вод шельфа моря Лаптевых в зоне влияния стока Лены (профиль вдоль меридиана, (130°30' ВД) показывают, что, они являются продуктом смешения двух компонентов — атлантических вод и вод реки Лены. Несмотря на сильное опреснение, большинство изученных вод можно назвать «водами с избыточной соленостью», поскольку при своих изотопных ($\delta^{18}\text{O}$, δD) параметрах они имеют более высокую соленость, которая должна формироваться только за счет опреснения речным стоком. Для таких модифицированных вод расчеты по модели трехкомпонентного смешения приводят к получению отрицательных оценок доли талого льда и завышению оценок вклада речных вод.

Предложенная нами модель смешения-модификации учитывает трансформацию связи изотопного состава и солености в процессах замерзания и пригодна для интерпретации вод, модифицированных при формировании льда. Эта модель позволяет корректно рассчитать вклад речных вод и установить долю сформированного льда. На основе расчетов по данной модели удалось установить, что в верхние горизонты континентального склона поступают модифицированные воды шельфа моря Лаптевых, что указывает на возможность переноса вод с шельфа в северном направлении. Расчет вклада опресняющих вод Лены позволил проследить поведение опресняющего компонента в зоне континентального склона. Заметное опреснение (не более 15–27%) затрагивает лишь верхние горизонты, до глубин около 20 м, далее содержание пресных вод резко падает и на глубинах более 50 м практически не ощущается. Сравнение данных, полученных по материалам, отобранным в 2015 и 2017 гг., показывает, что стратификация вод на шельфе моря Лаптевых носит устойчивый характер. Это согласуется с нашими более ранними результатами (Дубинина и др., 2017б).

Сравнение моделей трехкомпонентного смешения и смешения-модификации путем расчета одних и тех же параметров для одних и тех же образцов показывает, что каждая из моделей работает в своей области соотношений солености и изотопных параметров воды. Наиболее рациональным должен быть подход, когда в расчете используются либо одна, либо другая модель. Критерием, по которому каждая проба может быть отнесена к области применения той или иной модели, является знак величины $x(i)$,

рассчитываемой по уравнениям (3)–(5). Для вод, испытавших формирование льда и его удаление, величина $x(i)$ является положительной, и к таким образцам следует применять модель смешения-модификации. Для вод, опресненных талым компонентом, величина $x(i)$ является отрицательной, и к этим образцам можно применять модель трехкомпонентного смешения. При таком комплексном подходе расчеты будут освобождены от получения нереальных и отрицательных величин долей компонентов смеси, а также от завышенных оценок вклада речного компонента.

Авторы благодарят команду НИС «Академик Мстислав Келдыш» и чл.-корр. РАН М.В. Флинта за организацию экспедиционных работ, в ходе которых были получены необходимые материалы для настоящего исследования.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект 18-17-00089.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дубинина Е.О., Коссова С.А., Мирошников А.Ю., Фяйзуллина Р.В. (2017а) Изотопные (δD , $\delta^{18}\text{O}$) параметры и источники опресненных вод Карского моря. *Океанология* **57**(1), 38–48.
- Дубинина Е.О., Коссова С.А., Мирошников А.Ю., Кокряцкая Н.М. (2017б) Изотопная (δD , $\delta^{18}\text{O}$) систематика вод морей арктического сектора России. *Геохимия* (11), 1041–1052.
- Dubinina E. O., Kossova S. A., Miroshnikov A. Yu., Kokryatskaya N. M. (2017) Isotope (δD , $\delta^{18}\text{O}$) Systematics in Waters of the Russian Arctic Seas. *Geochem. Int.* **55**(11), 1022–1032.
- Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Кубряков А.А., Станичный С.В., Соловьев Д.М. (2015) Распространение и трансформация вод поверхностного опресненного слоя в Карском море. *Океанология* **55**(4), 502–513.
- Мамаев О.И. (1987) Термохалинный анализ вод Мирового океана. Л: Гидрометеиздат, 296 с.
- Aagard K. (1989) The Role of Sea Ice and Other Fresh Water in the Arctic Circulation. *J. Geophys. Res.* **94**(10), 14485–14498.
- Bauch D., Cherniavskaya E., Timokhov L. (2016) Shelf basin exchange along the Siberian continental margin: Modification of Atlantic Water and Lower Halocline Water. *Deep-Sea Res. I.* **115**, 188–198.
- Bauch D., Groger M., Dmitrenko I., Hölemann J. et al. (2011) Atmospheric controlled freshwater release at the Laptev Sea continental margin. *Polar Res.* **30**, 5858.
- Bauch D., Hölemann J.A., Dmitrenko I.A. et al. (2012) Impact of Siberian coastal polynyas on shelf-derived Arctic Ocean halocline waters. *J. Geophys. Res.* **117**.

- Bauch D., Torres-Valdes S., Polyakov I., Novikhin A., Dmitrenko I., McKay J., Mix. A. (2014) Halocline water modification and along-slope advection at the Laptev Sea continental margin. *Ocean Sci.* **10**, 141–154.
- Bauch, D., & Cherniavskaia, E. (2018) Water mass classification on a highly variable arctic shelf region: Origin of Laptev sea water masses and implications for the nutrient budget. *J. Geophys. Res.: Oceans.* **123**. <https://doi.org/10.1002/2017JC013524>
- Bauch, D., H. Erlenkeuser, and N. Andersen (2005), Water mass processes on Arctic shelves as revealed from ^{18}O of H_2O . *Glob. Planet. Change.* **48**, 165–174.
- Bauch, D., Hölemann J., Nikitina A., Wegner C., Janout M., Timokhov L.A., Kassens H. (2013) Correlation of river water and local sea-ice melting on the Laptev Sea shelf (Siberian Arctic). *J. Geophys. Res.* **118**, 550–561.
- Bauch, D., Hölemann J., Willmes S., Gröger M., Novikhin A., Nikulina A., Kassens H., Timokhov L. (2010) Changes in distribution of brine waters on the Laptev Sea shelf in 2007, *J. Geophys. Res.* **115**, C11008.
- Bauch, D., Schlosser, P., Fairbanks, R.F. (1995) Freshwater balance and the sources of deep and bottom waters in the Arctic Ocean inferred from the distribution of H_2^{18}O . *Prog. Oceanogr.* **35**, 53–80.
- Cooper L.W., McClelland J.W., Holmes R.M., Raymond P.A., Gibson J.J., Guay C.K., Peterson B.J. (2008) Flow-weighted values of runoff tracers (d^{18}O , DOC, Ba, alkalinity) from the six largest Arctic rivers, *Geophys. Res. Lett.* **35**, L18606.
- Cox G.F.N., Weeks W.F. Salinity variations in sea ice (1974) *J. Glac.* **13**(67), 109–120.
- Craig H., Gordon L. (1965) Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and the marine atmosphere. In: *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures, Spoleto, Italy*. (Ed. Tongiogi E.V., Lishi E. F., Pisa.), 9–130.
- Craig H. (1961) Isotopic variations in meteoric waters. *Science.* **133**, 1702–1703.
- Dickson R.R., Brown J. (1994) The production of North Atlantic Deep Water: Sources, rates, and pathways. *J. Geophys. Res.* **99**(6), 12319–12341.
- Dittmar T., Kattener G. (2003) The biogeochemistry of the river and shelf ecosystem of the Arctic Ocean: a review. *Marine Chem.* **83**, 103–120.
- Ekwurzel B., Schlosser P., Mortlock R., Fairbanks R. (2001) River runoff, sea ice meltwater, and Pacific water distribution and mean residence times in the Arctic Ocean. *J. Geophys. Res.* **106**(C5), 9075–9092.
- Frew R.D., Dennis P.F., Heywood K.J. et al. (2000) The oxygen isotope composition of water masses in the northern North Atlantic. *Deep-Sea Res.* **47**, 2265–2286.
- Gordeev V.V., Martin J.M., Sidorov I.S., Sidorova M.V. (1996) A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean. *Amer. J. Sci.* **296**, 664–691.
- Greiwanck P.J., Notz D. A 1-D modelling study of Arctic sea-ice salinity (2015) *The Cryosphere.* **9**, 305–329.
- Holmes, R.M., J.W. McClelland, S.E. Tank, R.G.M. Spencer, and A.I. Shiklomanov (2018) Arctic GRO. Water Quality Dataset. <https://www.arcticgreativers.org/data>
- Horita J., Wesolowski D.J., Cole D.R. (1993a) The activity-composition relationship of oxygen and hydrogen isotopes in aqueous salt solutions: I. Vapor-liquid water equilibration of single salt solutions from 50 to 100°C. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **57**, 2797–2817.
- Horita, J., Cole D.R., Wesolowski D.J. (1993b) The activity-composition relationship of oxygen and hydrogen isotopes in aqueous salt solutions: II. Vapor-liquid water equilibration of mixed salt solutions from 50 to 100°C and geochemical implications. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **57**, 4703–4711.
- Johnson M.A., Polyakov I.V. (2001) The Laptev Sea as a source for recent Arctic Ocean salinity changes. *Geophys. Res. Lett.* **28**(10), 2017–2020
- Jones E.P., Rudels B., Anderson L.G. (1995) Deep water of the Arctic ocean: origins and circulation. *Deep-Sea Res.* **42**(5), 737–760.
- Laukert G., Frank M., E.C. Hathorne, T. Krumpfen, Ben Rabe, D. Bauch, K. Werner, I. Peeken and H. Kassens. (2017) Pathways of Siberian Freshwater and Sea Ice in the Arctic Ocean Traced with Radiogenic Neodymium Isotopes and Rare Earth Elements. *Polarforschung.* **87**(1), 3–13.
- Lehmann M., Siegenthaler U. (1991) Equilibrium oxygen- and hydrogen-isotope fractionation between ice and water. *J. Glac.* **37**, 23–26.
- Létolle R., Martin J., Thomas A., Gordeev V., Gusarova S., Sidorov I. (1993) ^{18}O abundance and dissolved silicate in the Lena delta and Laptev Sea (Russia). *Marine Chem.* **43**, 47–64.
- Mueller-Lupp T., Erlenkeuser H., Bauch H.A. (2003) Seasonal and interannual variability of Siberian river discharge in the Laptev Sea inferred from stable isotopes in modern bivalves. *Boreas.* **32**(2), 292–303.
- Mysak L.A., Stoker T.F., Huang F. (1993) Century-scale variability in a randomly forced, two-dimensional thermohaline ocean circulation model. *Climate Dynamics.* **8**, 103–116.
- Ostlund H.G., Hut G. (1984) Arctic Ocean Water Mass Balance from Isotope Data. *J. Geophys. Res.* **89**, 6373–6381.
- Peterson R.G. (1989) The Subantarctic and Polar Fronts in Relation to Deep Water Masses Through the Southwestern Atlantic. *J. Geophys. Res.* **94**(8), 10817–10838.
- Redfield A.C., Friedman I. (1969) The effect of meteoric water, melt water and brine on the composition of polar sea water and of the deep waters of the ocean. *Deep-Sea Res.* **16**, 197–214.
- Shiklomanov, A.I., R.M. Holmes, J.W. McClelland, S.E. Tank, and R.G.M. Spencer (2018) Arctic GRO. Discharge Dataset. <https://www.arcticrivers.org/data>

- Schlosser P., Bauch D., Fairbanks R., Bonisch G. (1994) Arctic river-runoff: mean residence time on the shelves and in the halocline. *Deep-Sea Res.* **41**(7), 1053–1068.
- Thibodeau, B., D. Bauch, H. Kassens, and L. A. Timokhov (2014) Interannual variations in river water content and distribution over the Laptev Sea between 2007 and 2011: The Arctic Dipole connection, *Geophys. Res. Lett.* **41**, 7237–7244.
- Truesdell A. H. (1974) Oxygen isotope activities and concentrations in aqueous salt solutions at elevated temperatures: Consequences for isotope geochemistry. *Earth Planet. Sci. Lett.* **23**, 387–396.

MODIFICATION OF LAPTEV SEA FRESHENED SHELF WATERS BASED ON ISOTOPE AND SALINITY RELATIONS

Dubinina E.O.^{a,*}, Miroshnikov A.Yu.^a, Kossova S.A.^a, Shchuka S.A.^b

^a*Institute of the Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry (IGEM), Russian Academy of Sciences*

Russia, 119017 Moscow, Staromonetnyi per., 35

^b*PP Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences*

Russia, 117997 Moscow, Nakhimovskiy prospect, 36

**e-mail: elenadelta@gmail.com*

This paper is dedicated to the estimation of the river runoff contribution to the Arctic shelf waters, where freezing and melting of desalinated waters are intensively proceeding. A mixing-modification model is offered. The model takes into account the sea ice formation from desalinated waters on the shelf. The model was used to explain the data obtained from 63 and 69 cruises of the research vessel “Akademik Mstislav Keldysh” (2015 and 2017). Two sources of water masses — the Atlantic waters and the Lena river were established for the studied area of Laptev Sea. The waters in this zone are modified, i.e. they have a higher salinity than the one that corresponds to the two components mixing. The presence of modified waters generated at the Laptev Sea shelf is traced in the continental slope zone. Desalination in the continental slope zone reaches 15–27% and affects depths no more than 20 m, at more than 50 m depths it is practically disappeared. A mixing-modification model was proposed to calculate river water input in the modified waters. The data obtained for the Laptev Sea shelf were used to calculate the fraction of river waters according to both the proposed model and the conventional three-component mixing model of Ostlund and Hut, 1984. A comparison of the estimates obtained by both models has shown that the application of the three-component mixing model to modified waters leads to an overestimation of the river water contribution, which can reach 20%.

Each sample of shelf waters can be processed using either a mixture-modification model or a three-component mixing model. To choose the appropriate model the special criterion is proposed. Using this criterion, the calculations of river water and melted ice contribution will be free from the unrealistic or negative values.

Key words: oxygen isotopes, hydrogen isotopes, salinity, sea water, Laptev Sea, Lena, modified waters, sea ice

(For citation: Dubinina E.O., Miroshnikov A.Yu., Kossova S.A., Shchuka S.A. Modification of Laptev Sea Freshened Shelf Waters Based on Isotope and Salinity Relations. *Geokhimiya*. 2019;64(1):3–19. doi: 10.31857/S0016-752564113-19)