

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ГРАНИЦЕ ВОДА–ДНО В ПОРОВЫХ И НАДДОННЫХ ВОДАХ КАРСКОГО МОРЯ И МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

В. В. Сеницына¹, Г. В. Борисенко¹, А. А. Полухин¹

¹ *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: val-sinitcina@rambler.ru*

В работе представлены данные 63-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш», проходившего с 26 августа по 10 октября 2015 г. Основные районы работ включали западную часть Карского моря, заливы Новой Земли (Седова, Ога и Цивольки), разрез через желоб Воронина и разрез от дельты реки Лены до континентального склона в море Лаптевых. В рейсе проводился химический анализ поровых и наддонных вод на содержание нитритного, нитратного азота, кремния, фосфатов, общей щелочности и рН. Рассмотрены закономерности распределения концентрации кремния и фосфора на границе вода–дно. В Карском море анализ данных показал, что максимум концентраций биогенных элементов находится на глубине осадочного слоя до 10 см, ниже начинается их постепенное уменьшение. Во всех исследованных заливах Новой Земли концентрации биогенных элементов в иловых водах ниже, чем на прилегающем шельфе. В море Лаптевых содержание нитратов в иловых водах выше, а фосфатов – ниже, чем в Карском море. Различия в содержании биогенных элементов в наддонной и иловой воде связаны как с внешними факторами (речной сток), так и с физико-геологическими особенностями верхнего осадочного слоя исследованных районов.

Ключевые слова: Карское море, поровые воды, биогенные элементы, поверхностные донные осадки

Введение

В рамках программы «Экосистемы морей Сибирской Арктики» в августе–октябре 2015 г. проведены работы в 63-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (АМК) в морях Карском и Лаптевых (Флинт и др., 2016).

Карское море – бассейн на границе между западной и восточной российской Арктикой. 63-я экспедиция АМК была посвящена изучению экосистем крупнейших арктических эстуариев Оби и Енисея, оценке уровня и механизмов воздействия колоссального по объему речного стока на гидрофизические и гидрохимические условия, структуру и биологическую продукцию пелагических и донных экосистем арктического шельфа; оценке механизмов переноса и трансформации вещества в системе «эстуарий – шельф и континентальный склон – глубокий Арктический бассейн» и процессов в области Арктического континентального склона, определяющих взаимодействие между экосистемами шельфа и глубокого бассейна и влияющих на биологическую продуктивность Арктики (Флинт, 2010).

В Карское море впадают такие крупные реки как Обь и Енисей. Сток Енисея и Оби оказывает существенное влияние на распределение верхнего слоя моря (Лемешко, Цыганова, 2022). Смешение морских и пресных вод находит отражение в сложной и неоднозначной динамике Карского моря, меняющейся не только от сезона к сезону, но и от года к году в зависимости от климатических изменений. Наибольшее внимание при изучении геохимии Карского моря всегда уделялось процессам смешения пресных и морских вод и соответствующих фронтальных зон, где эти процессы выражены наиболее ярко.

Лена – одна из крупнейших рек мира, занимающая 10-е место среди всех рек по полноводности, она вторая среди рек России (после Енисея). Площадь водосбора реки – 2.42×10^6 км². Средний годовой расход Лены составляет порядка 17 000 м³/с, а средний годовой сток в море Лаптевых – 540 км³. Река Лена ежегодно выносит в море около 12 млн т взвешенных наносов и 41 млн т растворенных веществ (Костылева и др., 2020).

Основным источником, доставляющим осадочный материал на дно, является речной сток (Gordeev et al., 1996). На глубинах до 10 см в осадках наблюдается обогащение кремнием, который концентрируется за счет кварца с песчаной фракцией. В формировании состава взвесей первостепенное значение имеет расчлененность рельефа в составе пород, различие и способность потока переносить грубые частицы (в складчатых областях и легкоразмываемых пределах) (Гордеев, 1983).

Граница вода–дно – это зона активного изменения химических элементов. Масштабы химического обмена соизмеримы с потоками химических компонентов, которые источниками и реками вносятся в моря и океаны. Вертикальные потоки возникают в верхнем слое осадков. Вертикальные потоки биогенных элементов – индикаторы биологической активности, они могут влиять на изменения характеристик среды. Являясь дополнительным источником биогенных элементов из осадка, вертикальные потоки (поступление из осадка в толщу воды) становятся важным элементом круговорота веществ и моделирования экосистем (Проценко, 2015).

В Карском море в Обской губе и заливе Благополучия Новой Земли наблюдается повышенная доля ила – до 24 %, тогда как в центральной части моря преобладают осадки – мелкопесчано-илистые илы (Розанов, 2015). Воды бесстокового района насыщены O₂. Аэрированы они хорошо, кислорода в них не меньше 80 %, а в поверхностном слое – 117 % (Полухин, Маккавеев, 2017). Высокие показатели пресыщения связаны с фитопланктоном, повышенная продукция которого отмечалась ранее и, вероятно, была в это время самой большой по сравнению с другими районами Карского моря. Несмотря на кажущуюся бесстоковость района западной части Карского моря, в донных отложениях обнаруживается заметное влияние речного стока, относительно высокой биологической продуктивности вод и поступления органического вещества, что определяет особенности характера диагенеза осадков.

Иловая вода является средой, через которую осуществляется обмен химическими биогенными элементами. Возникновение концентраций градиентов обуславливает

формирование потоков растворенных компонентов как внутри осадка, так и через границу вода–дно (Химия морей и океанов, 1995).

Осадочные волны ориентированы под острым углом к простираению склона, поэтому придонные потоки должны быть направлены перпендикулярно или вниз по склону. Наиболее вероятно, что подобного рода течениями являются склоновые течения, возникающие в результате каскадинга. Процесс каскадинга (шельфовый конвекции, т. е. означающей вертикальное смешивание слоев воды) возникает, когда плотная вода, сформированная в результате образования льда или переохлаждения на континентальном шельфе, под действием силы тяжести стекает вниз по континентальному склону. Каскадинг на континентальном склоне арктического шельфа является важным процессом, формирующим вертикальную структуру водной толщи Арктики, но прямые наблюдения здесь крайне редки (Баранов и др., 2021).

Различия между взвесью, наилком и верхним слоем донных осадков могут указывать на быструю трансформацию органических соединений в процессах раннего диагенеза из-за интенсивного образования взвеси при таянии льда или короткопериодном изменении первичной продукции, что значительно меньше скорости “типично геологических” процессов в толще донных осадков. Наилкок представляет собой переходную форму материала между придонной взвесью и донным осадком. Химический состав взвеси реагирует больше на сезонные изменения, чем донные отложения. В нем содержание всех исследованных компонентов было выше, чем в верхнем слое донных осадков. Процессы превращения биогенных и загрязняющих веществ, а также обмен с водной средой, совершаются в активном слое ила, толщина которого изменяется в зависимости от свойств донных отложений от 5 до 20 см (Гордеев и др., 2014; Немировская и др., 2021).

В условиях глобального потепления таяние вечной мерзлоты может оказать влияние на химический состав морских вод Арктики. Таяние вечной мерзлоты является потенциальным источником органических и неорганических форм биогенных веществ и тяжелых металлов (Погожева и др., 2021).

Цель данной работы – исследование закономерности распределения концентрации биогенных элементов и параметров карбонатной системы на границе вода–дно.

Материалы и методы

Работы проводились в ходе комплексной экспедиции Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН в морях Карском и Лаптевых в 63-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» в августе–октябре 2015 года.

В Карском море выполнено два разреза: один в прибрежной зоне Новой Земли, включая заливы – Седова (ст. 5243), Ога (ст. 5248), Цивольки (ст. 5251) и станции из центральной и юго-западной частей моря: 5200, 5205, 5214; второй разрез в восточной части Карского моря проходил через желоб Воронина и включал станции 5232, 5236, 5240. Третий разрез в море Лаптевых включал метановые выходы – станцию 5231 и

станции 5215-2, 5223, 5224, 5225, 5227, 5228. Карта станций в Карском море и море Лаптевых, на которых был получен материал в ходе 63-го рейса НИС «Мстислав Келдыш», представлена на рисунке 1.

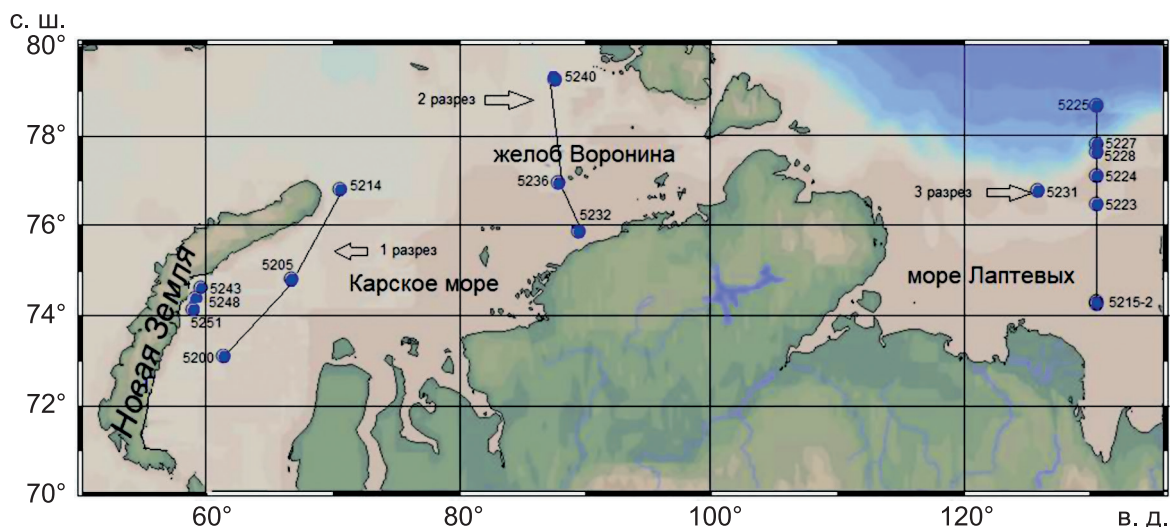


Рис. 1 – Карта станций (цифрами 1–3 обозначены разрезы)

Заливы Цивольки и Седова расположены на юго-восточном берегу Северного острова архипелага Новая Земля, в 45 км друг от друга. Залив Ога находится в непосредственной близости к заливу Цивольки и имеет схожие с ним размеры – ландшафтные и геометрические формы, глубины и строение донной поверхности. Море Лаптевых – окраинный водоем в Северном Ледовитом океане. Экстремально холодные воды больше полугода находятся под толщей льда.

В рейсе проводился анализ наддонных и поровых вод верхнего слоя осадков на содержание нитритного, нитратного азота, кремния, фосфатов. Также в пробах определялись значения щелочности и рН. Все определения проводились стандартными гидрохимическими методами, адаптированными к малым объемам проб (Маккавеев и др., 2017).

Также отбирались пробы донных осадков с помощью дночерпателей и геологических трубок, в том числе трубок Ниемисто, позволяющих производить отбор небольшого количества придонной воды над осадком. Влажность осадков определялась высушиванием образцов на воздухе до постоянного веса при 105 °С. Влажность осадков (высушивание навески на воздухе до постоянного веса) максимальна в поверхностных илах (более 60 %).

Гидрологические данные (температура и соленость вод) получены по результатам STD-зондирований (гидрофизический зонд SBE). Анализ проб на содержание фосфатов, силикатов, нитритов и нитратов, а также параметров карбонатной системы (водородный показатель рН и общая щелочность Alk) проводился по стандартным методикам, разработанным для морских гидрохимических исследований (Современные методы..., 1992). Содержание растворенного неорганического

углерода (DIC) рассчитывалось как сумма гидрокарбонат-иона, карбонат-иона и растворенного CO₂ в программе CO2Sys (Lewis and Wallace, 1998), используя данные pH и Alk. В расчете применялись константы диссоциации угольной кислоты по Рою (Roy et al., 1993), константа диссоциации иона HSO₄⁻ – по Диксону (Dickson, 1993).

Результаты и обсуждение

В Карском море основной фактор осадконакопления – поступление взвеси с водами Оби и Енисея, а также с течениями из Баренцева моря (Борисенко и др., 2021). Положение разрезов выбиралось таким образом, чтобы захватить как пресные воды, так и северозападный склон Карского моря. С зонами интенсивного окисления осадков в Карском море обычно связано присутствие в пелитовых илах железомарганцевых конкреций и корок, формирование которых происходит на геохимическом барьере, соответствующем границе окисленных и восстановленных илов.

Координаты станций на 1, 2 и 3 разрезах приведены в таблице 1.

Табл. 1 – Координаты станций на трех разрезах

Станции	Широта (с. ш.)	Долгота (в. д.)
5200	73.103	61.313
5205	74.783	66.583
5214	76.533	71.377
5215-2	74.25	130.31
5223	76.47	130.5
5224	77.102	130.488
5225	78.667	130.5
5227	78.092	130.51
5228	77.638	130.498
5231	76.773	125.825
5232	75.888	89.508
5236	76.968	87.84
5240	79.267	87.63
5243	74.71	59.767
5248	74.628	59.3
5251	74.383	58.878

На рисунке 2 представлены концентрации кремния, фосфора, общей щелочности, pH, DIC (растворенный неорганический углерод), нитриты (NO₂), нитраты (NO₃) на 1 разрезе вдоль Новой Земли, в заливах Седова, Ога, Цивольки; на 2 разрезе в желобе Воронина; на 3 разрезе от дельты реки Лены.

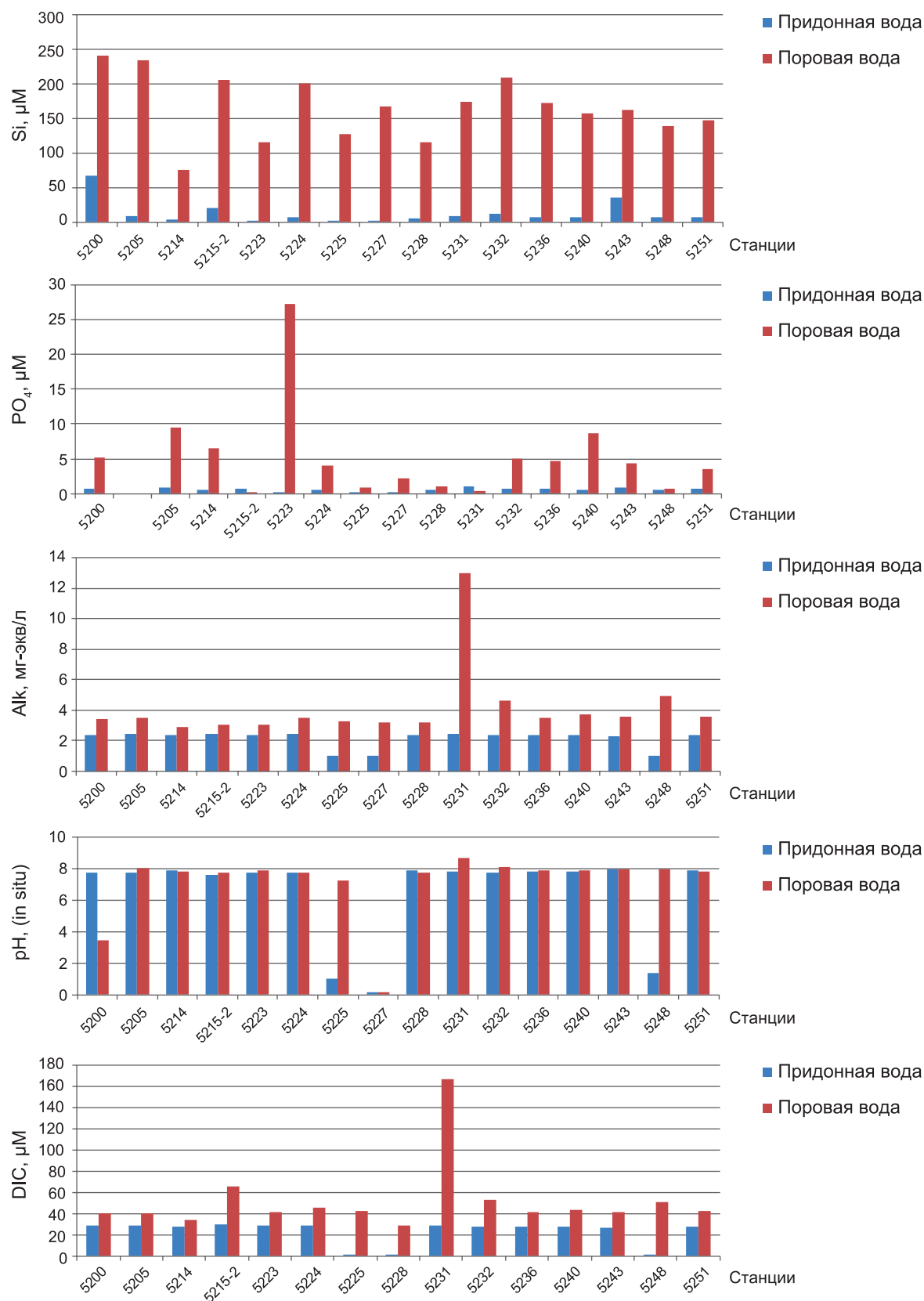


Рис. 2 – Концентрация кремния, фосфора, Alk, pH, DIC в наддонной воде (синие столбики), в поровой воде (красные столбики) на трех разрезах

Результаты экспедиционных определений представлены в таблице 2.

Табл. 2 – Содержание биогенных элементов в наддонной области
и слоях иловой воды на станциях

Станция	Глубина, м	Горизонт, см	pH _N BS	Alk, мгэкв/л	PO ₄ , μM	Si, μM	NO ₃ , μM	NO ₂ , μM	DC, мгС/л
Карское море									
5200									
Неймисто	87	–0.25	7.76	2.350	0.84	5.57	–	–	28.055
		–0.15	7.74	2.421	0.58	5.87	–	–	29.016
		–0.02	–	–	–	–	–	–	–
Поровые воды		0–4	7.63	3.026	5.37	255.13	–	–	36.852
		4–8	7.73	3.560	6.23	224.54	–	–	42.848
		8.5–18.5	8.1	3.560	4.60	140.77	–	–	41.322
	18.5–35	8.16	3.560	4.34	117.19	–	–	40.369	
5205									
Неймисто	191	–0.34	7.86	–	1.26	7.12	–	–	29.346
		–0.2	7.4	2.385	0.55	7.57	–	–	29.107
		–0.1	7.82	2.456	0.65	7.82	–	–	28.911
		–0.02	7.76	2.421	0.70	8.48	–	–	–
Поровые воды		0–5	7.88	2.848	8.97	194.99	–	–	33.511
		5–10	7.80	2.848	13.17	230.10	–	–	33.874
		10–22	8.12	3.382	2.88	141.82	–	–	38.617
		22–30	7.97	3.382	4.08	239.13	–	–	39.418
	30–43	8.08	3.738	8.88	260.19	–	–	42.904	
	43–50	8.07	4.628	18.99	337.44	–	–	53.343	
5214									
Неймисто	155	–0.4	7.83	2.314	0.42	3.41	–	–	27.262
		–0.2	7.83	2.403	0.45	3.51	–	–	28.349
		–0.1	7.82	2.403	0.56	3.91	–	–	28.365
		–0.02	7.86	2.492	0.56	4.01	–	–	29.293
Поровые воды		0–3	7.74	2.848	8.20	82.10	–	–	34.061
		5–12	7.76	3.204	8.59	95.90	–	–	38.278
		12–20	7.84	2.848	6.53	98.65	–	–	33.609
		5–12	7.76	3.204	8.59	95.90	–	–	38.278
	12–20	7.76	2.350	0.84	5.57	–	–	28.055	
Залив Седова									
5243									
Неймисто	190	–0.4	7.94	2.385	0.56	7.07	–	–	27.785
		–0.2	7.93	2.278	0.56	6.92	–	–	26.584
		–0.3	7.93	2.350	0.58	7.02	10.92	0.01	27.409
		–0.1	7.96	2.278	0.74	7.02	9.40	0.01	26.458
Поровые воды		0–3	7.81	2.848	1.63	145.97	18.27	0.07	33.862
		3–13	7.96	3.382	1.89	153.99	6.44	0.02	39.487
		13–21	7.96	3.916	6.77	176.56	10.64	0.01	45.768
		21–28	7.97	4.094	4.29	158.51	10.03	0.01	47.85
Залив Ога									
5248									
Неймисто	131	–0.2	–	–	0.57	6.47	–	–	–
		–0.1	–	–	0.63	6.52	–	–	–
		–0.02	–	–	0.56	6.62	10.17	0.07	–

Станция	Глубина, м	Горизонт, см	pH BS	Alk, мгэкв/л	PO ₄ , μM	Si, μM	NO ₃ , μM	NO ₂ , μM	DC, мгС/л
Поровые воды	131	0–3	7.99	3.026	–	73.19	15.44	–	35.135
		3–13	7.92	3.560	0.93	121.84	6.94	–	41.808
		13–23	7.93	3.738	0.84	139.90	5.52	–	43.877
		23–33	7.95	3.916	0.58	164.48	8.79	–	45.846
		33–43	7.93	7.654	0.58	165.48	12.78	–	90.314
Залив Цивольки									
5251									
Неймисто	119	–0.2	7.86	2.314	0.65	5.67	–	–	27.276
		–0.1	7.94	2.492	0.65	5.82	9.43	0.06	29.061
		–0.02	–	–	0.69	6.17	9.59	0.06	–
Поровые воды	119	0–3	7.66	3.204	1.61	144.83	29.90	0.99	38.853
		3–13	7.79	3.560	2.81	173.92	14.95	0.32	42.519
		13–23	7.84	3.916	6.15	146.33	8.00	0.28	46.495
Желоб Воронина									
5232									
Неймисто	50	–0.3	7.61	2.385	0.59	11.24	8.85	0.35	29.085
		–0.2	7.77	2.350	0.90	11.49	7.57	0.12	28.036
		–0.1	7.72	2.314	0.81	11.84	8.97	0.09	27.779
Поровые воды	50	0–3	7.72	3.560	4.03	294.81	14.63	0.81	42.928
		6–16	8.10	4.450	5.48	165.39	9.49	0.23	51.101
		16–26	8.14	4.628	–	170.91	10.86	0.18	52.881
		26–36	8.18	4.984	3.09	154.86	13.01	0.18	56.622
		36–43	8.04	4.984	8.57	297.31	29.64	0.18	57.788
43–47	8.20	5.340	4.20	163.39	11.73	0.23	60.501		
5236									
Неймисто	90	–0.4	7.78	2.385	0.51	7.22	–	–	28.451
		–0.2	7.78	2.350	0.81	7.07	–	–	28.022
		–0.1	7.79	2.385	0.65	6.82	8.01	–	28.401
		–0.02	7.79	2.385	0.96	7.67	6.88	–	28.405
Поровые воды	90	0–3	8.03	3.204	–	211.04	20.81	–	37.057
		4–14	7.56	3.560	4.53	179.44	15.18	–	43.799
		14–25	8.00	3.738	4.96	125.26	23.44	–	43.483
5240									
Неймисто	290	–0.2	7.76	2.385	0.52	6.12	–	–	28.504
		–0.1	7.78	2.350	0.56	6.37	10.95	0.50	27.999
		–0.02	7.76	2.314	0.60	6.57	8.99	0.45	27.631
Поровые воды	290	0–5	7.63	2.492	14.83	222.12	45.24	0.18	30.292
		5–10	7.69	3.026	2.23	223.62	35.23	0.27	36.552
		10–18	7.78	3.204	5.48	206.57	18.85	0.27	38.257
		18–27	7.94	4.094	16.28	153.90	13.73	0.32	48.042
		28–33	8.11	4.450	5.83	94.21	9.49	0.23	50.984
		33–41	8.02	4.450	10.20	105.75	27.24	0.36	51.704
41–48	8.14	4.628	5.66	90.70	12.96	0.23	52.795		
Море Лаптевых									
5215-2									
Неймисто	25	–0.4	7.54	2.385	0.58	20.16	–	–	29.402
		–0.2	7.57	2.456	0.63	20.42	–	–	30.151
		–0.1	7.59	2.456	0.65	20.11	–	–	30.099
		–0.02	7.62	2.492	0.64	20.57	–	–	30.394

Продолжение таблицы 2

Станция	Глубина, м	Горизонт, см	pH _N BS	Alk, мгэкв/л	PO ₄ , μM	Si, μM	NO ₃ , μM	NO ₂ , μM	DIC, мгС/л
Поровые воды	25	0–3	7.72	3.026	–	–	–	–	36.494
		3–10	7.66	3.026	4.80	205.57	–	–	36.737
		10–22	7.86	3.026	3.43	203.56	–	–	35.843
5223									
Неймисто	55	–0.2	7.71	2.385	0.51	20.42	–	–	28.737
		–0.1	7.73	2.385	0.49	20.11	–	–	28.648
		–0.02	7.74	2.421	0.51	20.57	–	–	29.036
Поровые воды		0–2	7.61	3.026	2.83	218.93	–	275.4	36.994
		2–12	7.90	3.026	6.34	238.99	–	508.7	44.139
		12–19	8.19	3.026	3.17	144.19	–	350.5	44.348
5224									
Неймисто	60	–0.4	7.70	2.421	0.42	6.92	–	–	29.174
		–0.2	7.72	2.456	0.48	7.12	–	–	29.553
		–0.02	7.72	2.385	0.51	7.42	9.29	–	28.681
Поровые воды		0–2	7.31	3.204	2.80	219.11	96.16	0.72	41.081
		2–7	7.64	3.560	6.31	239.17	74.16	0.77	43.383
		7–18	7.74	4.806	3.14	144.37	101.67	0.45	57.909
		2–12	7.90	3.026	6.34	238.99	–	508.7	44.139
		12–19	8.19	3.026	3.17	144.19	–	350.5	44.348
5225									
Поровые воды	180	0–2	7.16	2.670	1.09	82.67	50.32	0.23	35.274
		2–9	7.23	3.382	1.18	124.81	46.95	0.23	44.009
		9–11	7.17	3.382	0.58	147.88	25.68	0.54	44.544
		11–17	7.35	3.560	0.49	150.39	34.85	0.32	45.186
5227									
Поровые воды	200	0–2	–	3.204	1.60	108.30	58.99	0.68	–
		2–14	–	3.204	2.03	182.04	58.85	0.50	–
		14–19	–	3.204	2.71	210.13	43.95	–	–
5228									
Неймисто	100	–0.4	7.88	2.421	0.53	4.77	–	–	28.462
		–0.2	7.84	2.385	0.51	4.82	–	–	28.197
		–0.1	7.81	2.421	0.52	5.02	9.65	–	28.739
		–0.02	7.87	2.421	0.51	5.07	8.25	–	28.505
Поровые воды		0–2	7.76	3.204	–	–	62.67	0.81	38.369
		2–8	7.64	3.204	–	147.93	66.72	0.68	38.97
		8–13	7.79	3.204	–	80.71	95.17	1.40	38.21
Полигон «Сипы»									
5231									
Неймисто	71	–0.2	7.79	2.492	0.45	7.42	7.01	1.24	29.666
		–0.1	7.83	2.456	0.42	7.47	8.01	0.09	29.087
		–0.02	7.79	2.421	0.48	8.38	7.74	0.09	28.827
Поровые воды		1–3	–	6.764	–	–	–	–	–
		3–15	8.75	14.418	–	113.36	0.67	4.95	145.709
		8–15	8.61	17.800	–	232.74	214.43	0.63	187.623

Заливы Северного острова Новой Земли

Район Новой Земли и западная часть Карского моря. Заливы Новой Земли

Трубки Неймисто отбирались в трех заливах Новой Земли: Седова, Ога и Цивольки. В результате отобранные колонки осадка показали наличие голоценовых однородных мягких пелитовых илов очень темного серого цвета (Экосистемы морей Сибирской Арктики, 2018). При определенных метеорологических условиях материковые воды могут поступать в заливы Северного острова Новой Земли, тем самым меняя их гидрохимический и гидрофизический режимы. Морской арктический климат архипелага Новая Земля характеризуется неустойчивой циклонической погодой, ураганными ветрами, резкими температурными колебаниями, значительным количеством выпадающих осадков. Соленость внутри заливов Северного острова Новой Земли, Ога, Седова и Цивольки на прилежащем шельфе Новой Земли – 22.5–23.7 епс. В 2014 г. экспедицией в этом районе была выявлена соленость выше 24–28 епс. Столь значительное понижение солености, вероятно, не связано с возросшим объемом стока с Новой Земли, а определялось процессами обмена заливов с акваторией Карского бассейна, поверхностные воды которого были опреснены в 2015 г. в центральной и северо-западной части стоком Оби и Енисея (Маккавеев и др., 2017).

В наддонной и иловой воде залива Ога (станция 5248) наблюдалась пониженная, по сравнению с другими заливами, концентрация фосфатов во всей отобранной трубке осадочного материала. Во всех заливах концентрации PO_4 ниже, чем в открытых частях моря Лаптевых и Карского моря. При низком содержании PO_4 отмечены довольно высокие концентрации кремния в поровых водах, продолжающие увеличиваться с глубиной. На глубине 30 см происходит резкий скачок величины щелочности (с 3.9 до 7.6 мг-экв/л).

В таблице 3 представлен диапазон величин pH, Alk, PO_4 , Si, NO_2 , NO_3 в заливах Новой Земли.

Табл. 3 – Диапазон величин pH, Alk, PO_4 , Si, NO_2 , NO_3 в заливах Новой Земли

	pH, NBS	Alk, мгэкв/л	PO_4 , μM	Si, μM	NO_3 , μM	NO_2 , μM
Максимум	7.99	7.65	6.77	176.56	29.90	0.99
Минимум	7.66	2.85	0.58	73.19	5.52	0.01
Среднее значение	7.83	5.5	3.68	124.88	17.71	0.5

На рисунке 3 на 1 разрезе показано распределение щелочности, pH, NO_2 , NO_3 , PO_4 , Si в трех заливах Новой Земли.

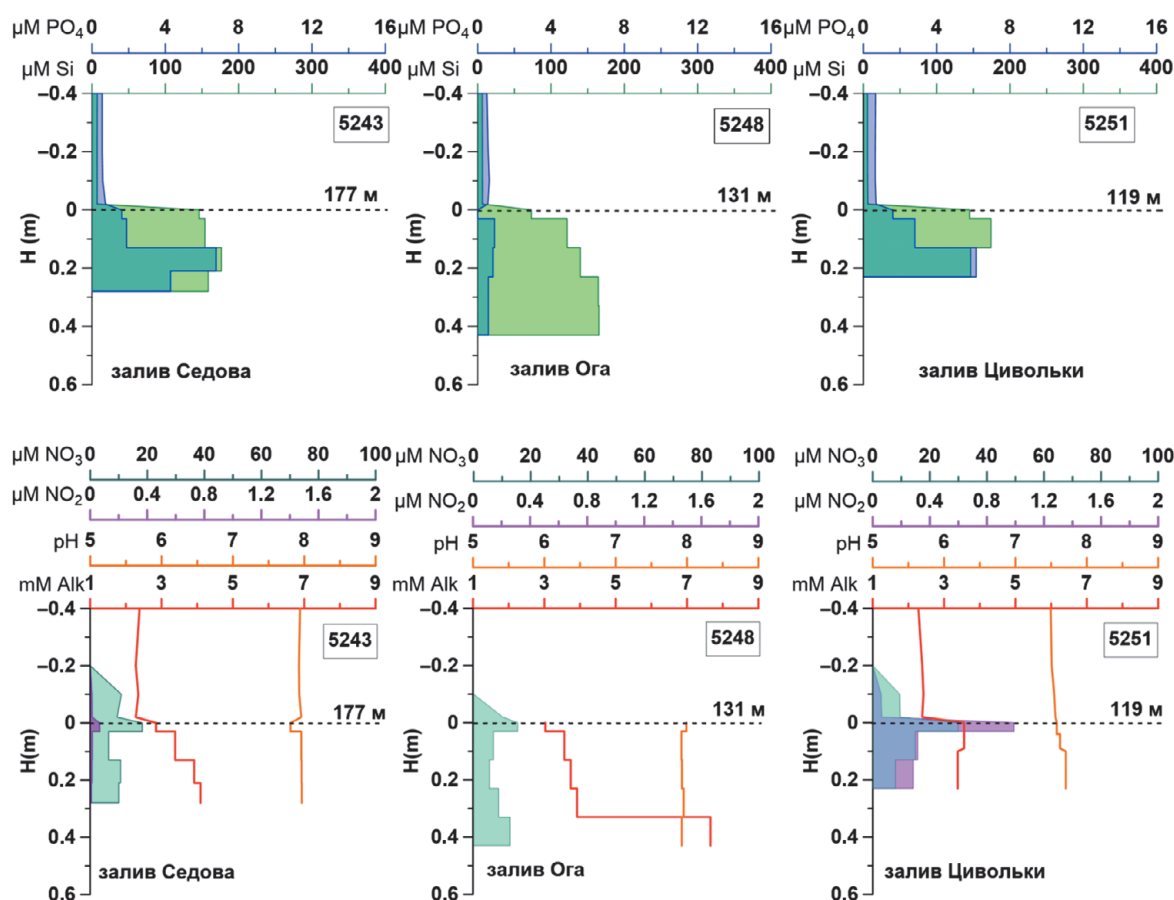


Рис. 3 – Распределение Alk, pH, NO₂, NO₃, PO₄, Si на 1 разрезе в трех заливах Новой Земли

В распределении нитратов не выделяется экстремумов ни в одном из заливов, за исключением залива Цивольки. Там непосредственно под границей вода–дно повышаются концентрации как нитратов, так и нитритов – это сопровождается небольшим ростом щелочности, но никак не отображается на величине pH.

В заливе Цивольки наблюдалось большее содержание кремния, чем в заливах Седова и Ога. Анализ щелочности в водотоках заливов Седова, Ога и Цивольки выявил, что показатель варьируется в широком диапазоне, при этом щелочность водотоков в среднем в 3 раза ниже, чем в воде заливов.

Концентрация Si и PO₄ представлена в поровых водах большими значениями, чем в наддонной воде. Максимум концентрации элементов находится на глубине до 10 см, ниже начинается их постепенное уменьшение. В поровых водах в поверхностном слое наблюдается повышенное содержание концентрации Si и PO₄, по сравнению с пробами из наддонной воды.

Разрез 1. Западная часть Карского моря

В Карском море на 1 разрезе вдоль Новой Земли были взяты три трубки Неймисто. На рисунке 4 представлена схема рельефа дна и распределение pH, щелочности, фосфора и кремния на 1 разрезе в Карском море.

По результатам измерений, максимум концентраций ($270 \mu\text{M Si}$, $7\text{--}12 \mu\text{M PO}_4$) находится на глубине до 10 см, ниже начинается их постепенное уменьшение. Исключение составляет станция 5205, где с 20 см снова начинается рост концентраций и на глубине осадка 40–50 см находится второй максимум, превышающий первый ($337.4 \mu\text{M Si}$, $20 \mu\text{M PO}_4$).

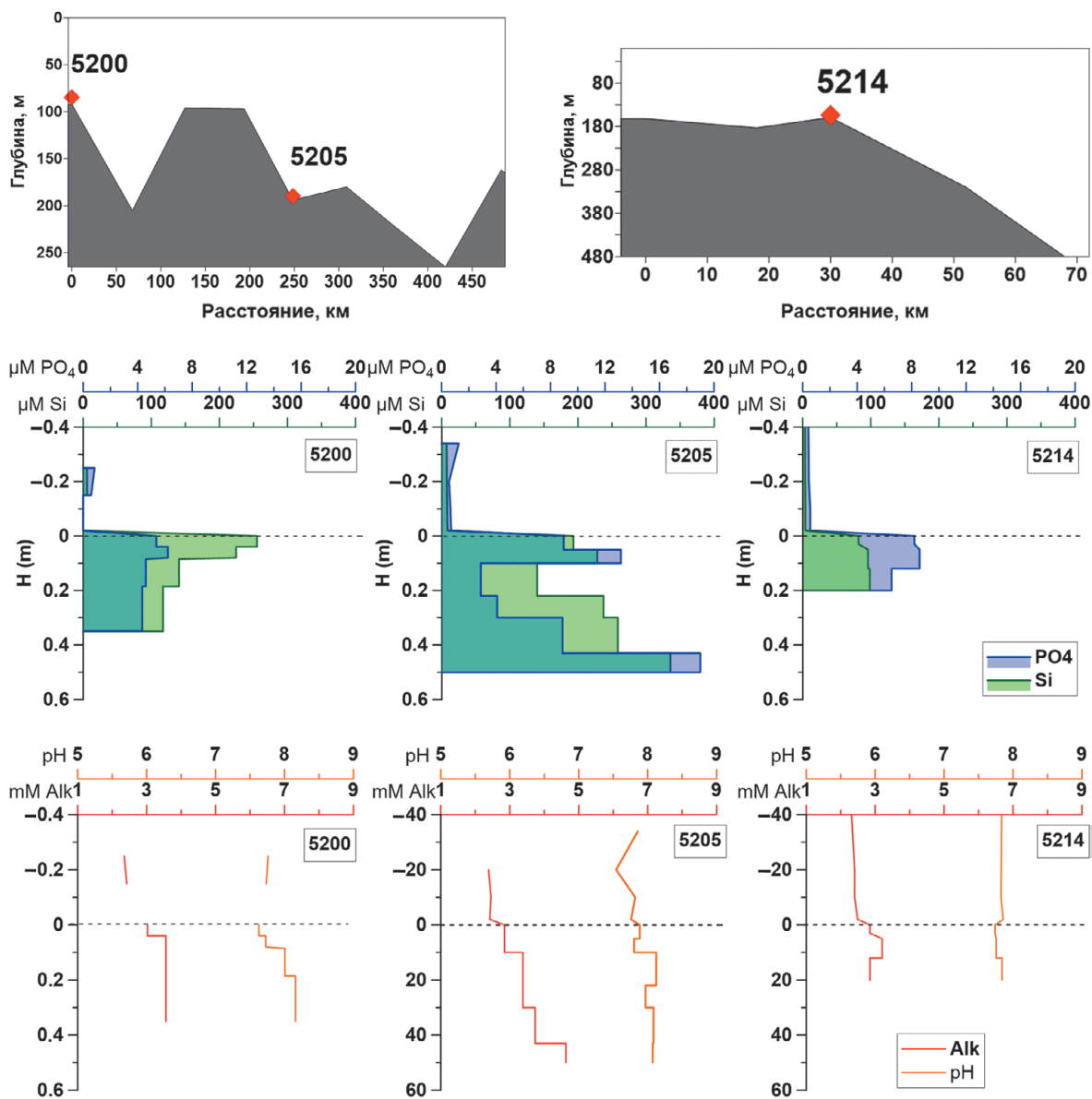


Рис. 4 – Схема рельефа дна и распределение pH, щелочности, PO_4 , Si на 1 разрезе в Карском море

В таблице 4 представлен диапазон величин pH, Alk, PO₄, Si на 1 разрезе в Карском море.

Табл. 4 – Диапазон величин pH, Alk, PO₄, Si на 1 разрезе в Карском море

	pHNBS	Alk, мгэquiv/л	PO ₄ , μM	Si, μM
Максимум	8.16	4.63	18.99	337.44
Минимум	7.63	2.85	2.88	82.10
Среднее значение	7.90	3.74	10.94	209.77

Разрез 2. Восточная часть Карского моря (желоб Воронина)

Три трубки Неймисто были взяты в Карском море на разрезе 2 в районе желоба Воронина. Самая северная станция из них находилась на 79.2° с. ш. (станция 5240). На рисунке 5 на станциях 5232, 5236, 5240 представлено распределение фосфора, кремния, нитритов, нитратов, щелочности и pH на 2 разрезе в желобе Воронина. На станции 5240 происходит постепенное снижение концентраций кремния с увеличением глубины осадка. Параллельно наблюдается рост концентрации фосфора, перемежаясь со слоями его пониженных концентраций.

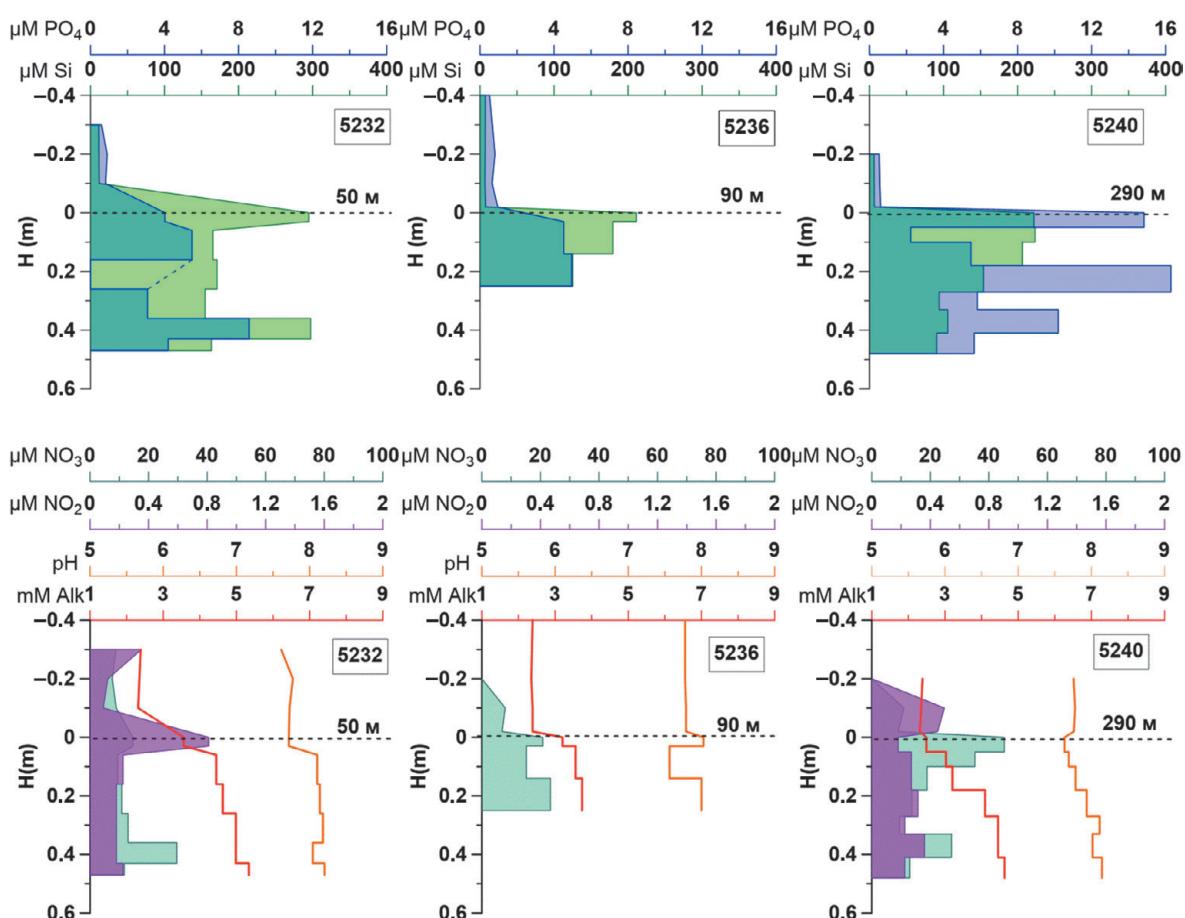


Рис. 5 – Распределение PO₄, Si, NO₃, NO₂, Alk и pH на 2 разрезе в желобе Воронина

В таблице 5 представлен диапазон величин pH, Alk, PO₄, Si, NO₂, NO₃ в желобе Воронина.

Табл. 5 – Диапазон величин pH, Alk, PO₄, Si, NO₂, NO₃ в желобе Воронина

	pH NBS	Alk, мгэquiv/л	PO ₄ , μM	Si, μM	NO ₃ , μM	NO ₂ , μM
Максимум	8.20	5.34	16.28	297.31	45.24	0.81
Минимум	7.56	2.49	2.23	90.70	9.4	0.23
Среднее значение	7.88	3.92	9.26	194.01	27.32	0.52

Разрез 3. Центральная часть моря Лаптевых

В море Лаптевых на меридиональном разрезе было отобрано 6 трубок Неймисто, на глубоководных станциях (>2 км) поровые воды отжимались из осадков, взятых черпаком.

На рисунке 6 представлено распределение фосфора и кремния на станциях 5218, 5220, 5215-2, 5223, 5224, 5227, 5228 на разрезе 3 в море Лаптевых.

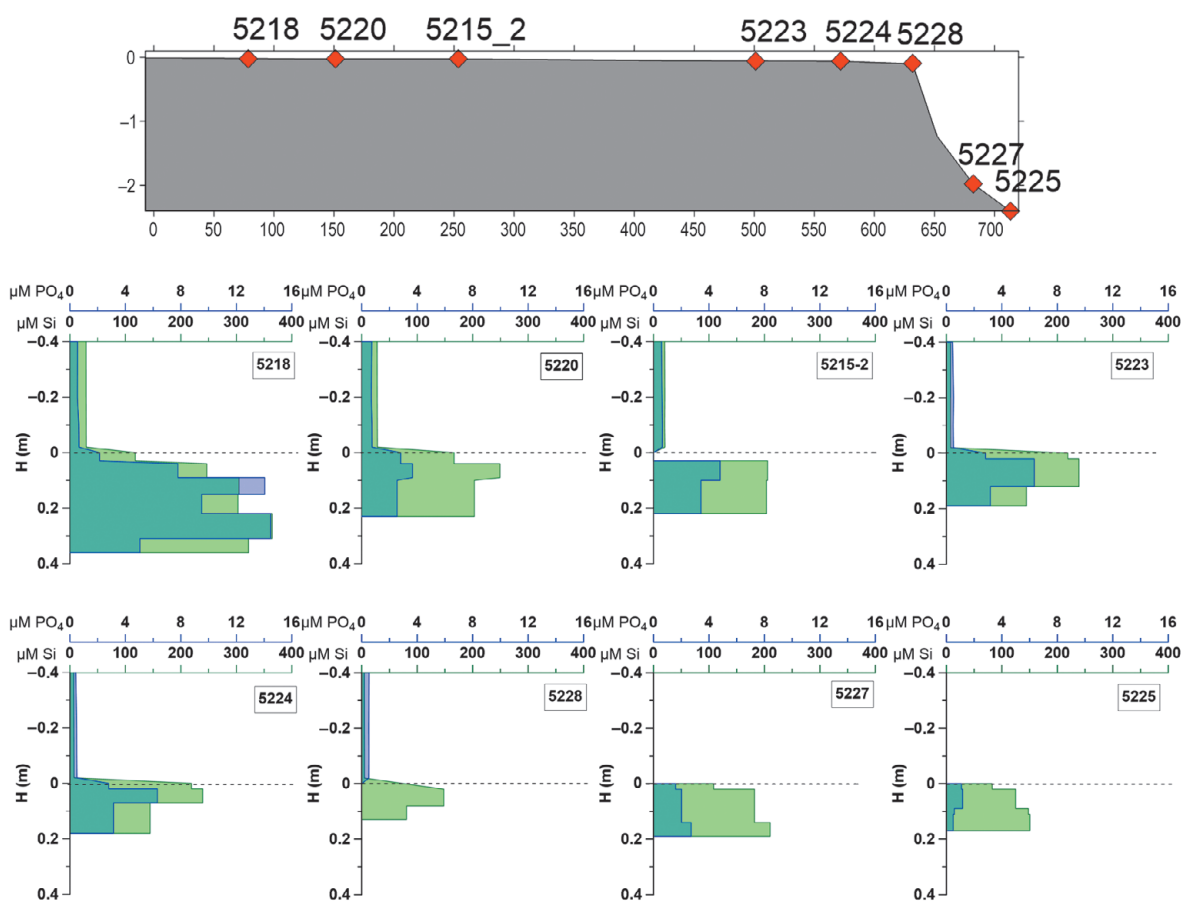


Рис. 6 – Распределение PO₄, Si на 3 разрезе в море Лаптевых

На станции 5218 наблюдаются самые высокие на 3 разрезе концентрации PO_4 и Si (рисунок 6), однако их максимумы находятся не сразу под границей вода–дно, а на глубине 10–15 см. Структура распределения станции 5205 в Карском море, с двумя максимумами и промежуточным минимумом, повторяется.

На рисунке 7 в районе метановых выделений представлены диапазоны величин pH, Alk, PO_4 , Si, NO_2 , NO_3 станции 5231 на разрезе 3 в море Лаптевых.

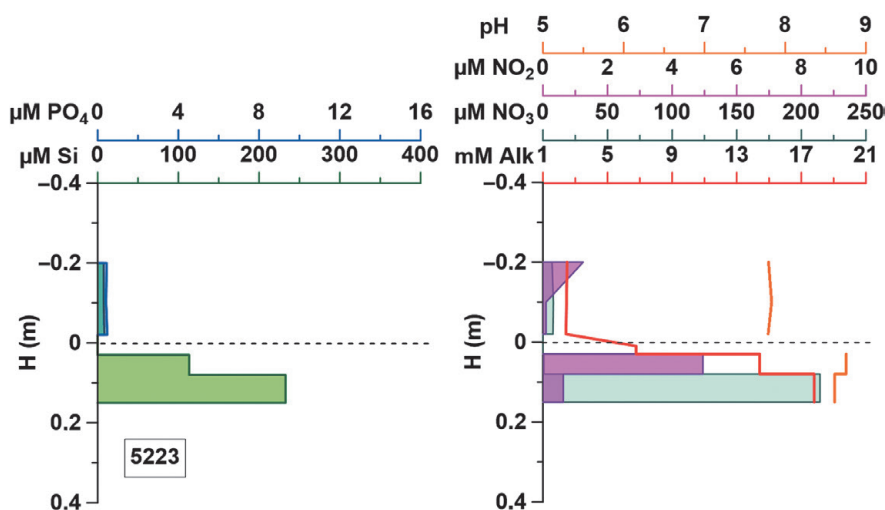


Рис. 7 – Распределение pH, Alk, PO_4 , Si, NO_2 , NO_3 станции 5231 на разрезе 3 в море Лаптевых

В таблице 6 представлен диапазон величин pH, Alk, PO_4 , Si, NO_2 , NO_3 на разрезе 3 в море Лаптевых.

Табл. 6 – Диапазон величин pH, Alk, PO_4 , Si, NO_2 , NO_3 на разрезе 3 в море Лаптевых

	pH NBS	Alk, мгэкв/л	PO_4 , μM	Si, μM	NO_3 , μM	NO_2 , μM
Максимум	8.19	8.19	14.48	364.57	101.67	1.40
Минимум	7.16	2.67	0.49	80.71	25.68	0.23
Среднее значение	7.68	5.43	7.49	222.64	63.68	0.82

На рисунке 8 представлено на станциях 5218, 5220, 5215-2, 5223, 5224, 5225, 5227, 5228 распределение щелочности, pH, нитритного азота (NO_2), нитратного азота (NO_3) на 3 разрезе в море Лаптевых.

Станция 5218, наиболее близкая к дельте Лены, отличается повышенными показателями щелочности (8.01 мг-экв/л) в слое 31–36 см (рисунок 8). На станции 5224 концентрации нитратного азота не сильно меняются (96–101 μM NO_3) во всей отобранной трубке (18 см), кроме слоя 2–4 см. Уменьшение нитратов сопровождается ростом концентрации нитритов (NO_2) и пониженным pH. Схожая структура у разреза на станции 5225, но там активный слой нитратов расположен чуть глубже, в слое 9–11 см. Подобное распределение свидетельствует о наличии активных окислительно-восстановительных процессов.

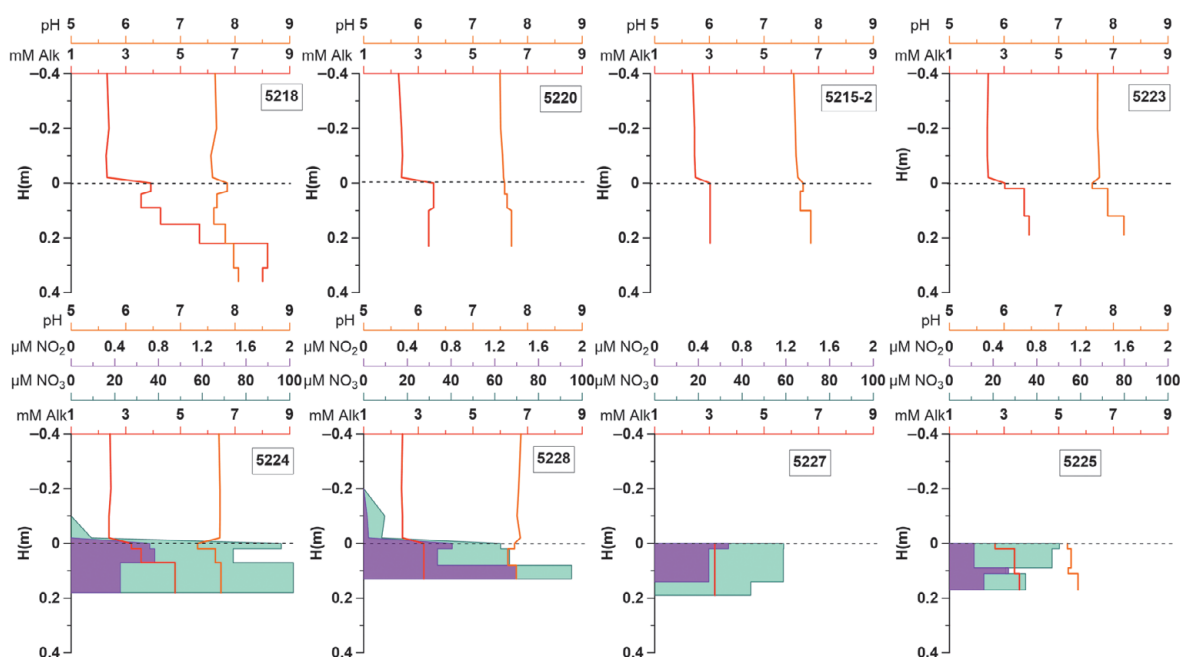


Рис. 8 – Распределение Alk, pH, NO₂, NO₃ на 3 разрезе в море Лаптевых

На разрезе 1 с увеличением глубины станций, с юга на север, наблюдается постепенное снижение концентраций всех рассмотренных элементов. Таким образом, можно предположить, что повышенные концентрации на прибрежной станции вызваны разложением органического вещества речного происхождения. Занижение же слоя максимума может быть вызвано активной биотурбацией и адвекцией в зоне активного осадконакопления. Адвекция – это горизонтальное движение масс воды, которые сохраняют свойства и не перемешиваются с другими слоями воды.

Концентрация Si в Карском море высокая (176.56 μM – станция 5243, залив Седова) в поровых водах, что говорит о том, что на формирование их физико-химических свойств оказывают влияние биологические и физико-химические процессы. По результатам измерений, максимум концентраций (270 μM Si, 7–12 μM PO₄) находится на глубине до 10 см, ниже начинается их постепенное уменьшение. Исключение составляет станция 5205, где с 20 см снова начинается рост концентраций и на глубине 40–50 см находится второй максимум, превышающий первый (337,4 μM Si, 20 μM PO₄). Вероятнее всего, он образуется в отдельные, наиболее холодные, зимы, когда конвекция захватывает более соленые воды с поверхности глубины. Постоянно низкие температуры во всей толще вод Новоземельской впадины характеризуют специфические условия, в которых протекают процессы регенерации вещества в водной толще и осадках, и обитает донная и пелагическая биота.

На 2 разрезе в желобе Воронина на станции 5240 происходит постепенное снижение концентраций кремния с увеличением глубины осадка (см. рисунок 5). Параллельно наблюдается рост концентрации PO₄, перемежаясь со слоями его пониженных концентраций. Колонка осадка представлена алевроитом с высоким содержанием

глинистых минералов. В целом колонка является типичным представителем глубоководных отложений желобов.

Речной генезис поверхностных вод в восточной части Карского моря (2 разрез) и в море Лаптевых (3 разрез) подтверждается высокими концентрациями растворенного Si – более 380 μM , и высокими значениями щелочности – 7.16–8.19 мг-экв/л в иловых водах. В море Лаптевых (3 разрез) иловые воды характеризовались низкой концентрацией PO_4 и высокой концентрацией азота (14.8 μM и 101.7 μM соответственно), а западная (1 разрез) и восточная часть (2 разрез) Карского моря – низкими концентрациями (16.28 μM и 45.24 μM) азота в форме нитратов и повышенной относительно моря Лаптевых (18 и 16 μM соответственно) концентрацией фосфатов.

Станция 5218, наиболее близкая к дельте Лены, отличается повышенными показателями щелочности (8.01 мг-экв/л) в слое 31–36 см (см. рисунок 7). Уменьшение нитратов сопровождается ростом концентрации нитритов (NO_2) и пониженным рН. Схожая структура у разреза на станции 5225, но там активный слой нитратов расположен чуть глубже, в слое 9–11 см. Подобная картина свидетельствует о наличии активных окислительно-восстановительных процессов.

В море Лаптевых (станция 5231, полигон «Сипы») осадки были представлены двумя гранулометрическими типами: 1) мелкоалевритовые илы с примесью крупного алеврита или мелкозернистого песка; 2) сильно заиленный мелкозернистый песок или крупный алеврит. Характерной чертой метановых сипов является пространственная пятнистость. Повышенное содержание концентрации кремния и фосфора наблюдается в наддонной воде и поверхностном слое поровых вод.

Заключение

Получены профили вертикального распределения биогенных элементов в наддонной воде и иловых водах осадков и поверхностном слое донных осадков в западной части Карского моря, на континентальном склоне для районов Карского моря (отрог желоба Св. Анны и прилегающий внешний шельф, желобе Воронина, заливы: Седова, Ога, Цивольки Новой Земли), а также шельфа и континентального склона моря Лаптевых.

В Карском море анализ данных показал, что максимум концентраций (270 μM Si, 7–12 μM PO_4) находится на глубине осадочного слоя до 10 см, ниже начинается их постепенное уменьшение. Исключение составляет станция 5205, где с 20 см осадочного слоя снова начинается рост концентраций и на глубине 40–50 см находится второй максимум, превышающий первый (337,4 μM Si, 20 μM PO_4). На разрезе в желобе Воронина происходит постепенное снижение концентраций кремния с увеличением глубины осадка. На разрезе в море Лаптевых отмечено повышенное значение общей щелочности (8.01 мг-экв/л) в слое осадка 31–36 см. Уменьшение нитратов сопровождается ростом концентрации нитритов (NO_2) и пониженным рН. Содержание нитратов в иловых водах выше, а фосфатов – ниже, чем в Карском море.

Во всех исследованных заливах Новой Земли концентрации биогенных элементов в иловых водах ниже, чем на прилегающем шельфе. Максимум нитратов в иловых водах отмечен в заливе Цивольки и сопровождается небольшим ростом общей щелочности, что не отражается на величине рН. Фосфор и кремний представлены в поровых водах в большей степени, чем в наддонной воде на высоте до 10 см от дна.

Пониженные значения рН могут быть связаны и с большим содержанием в речных водах гуминовых кислот, входящих в состав растворенного органического вещества.

Поступление к поверхности неорганического углерода из придонного слоя в результате перемешивания являлось дополнительным фактором, определяющим динамику параметров карбонатной системы. Влияние речных вод в исследованном районе Карского моря было сильно снижено по сравнению с придельтовой частью моря Лаптевых, что прослеживалось по распределению величин общей щелочности и кремния.

Благодарности. Выражаем благодарности академику Флинту М. В. за организацию экспедиций и возможность получить данные, к.б.н. Удалову А. А. за помощь при отборе проб, коллегам из Лаборатории биогидрохимии за помощь при обработке проб в ходе экспедиции. Также мы благодарим в.н.с. Лаборатории биогидрохимии д.г.н. Доманова М. М. за оценку этой работы и замечания, которые помогли улучшить статью.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН № FMWE-2021-0007.

Список литературы

1. Баранов Б. В., Флинт М. В., Римский-Корсаков Н. А., Поярков С. Г., Дозорова К. А. Осадочные волны и реконструкция придонных течений в Новоземельской впадине Карского моря // Доклады Академии наук; Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 498. № 1. С. 273–293.
2. Борисенко Г. В., Маккавеев П. Н., Стунжас П. А. Концентрация и диффузные потоки биогенных элементов в системе «поровые воды – наддонные воды» в эстуарии реки Оби // Океанология. 2021. Т. 61. № 1. С.25–33.
3. Гордеев В. В. Речной сток в океан и черты его геохимии. Москва: Наука, 1983. 160 с.
4. Гордеев В. В., Леин А. Ю., Беляев Н. А., Иванов М. В. Распределение тяжелых металлов в придонной взвеси, наилке и донных осадках на Енисейском профиле в Карском море // Доклады Академии наук. 2014. Т. 456. № 5. С. 575–580.
5. Костылева А. В., Полухин А. А., Степанова С. В. Особенности гидрохимической структуры зоны смешения вод реки Лены и моря Лаптевых в осенний период // Океанология. 2020. Т. 60. № 6. С. 843–850. <https://doi.org/10.1134/S0001437020060053>.
6. Лемешко Е. М., Цыганова М. В. Межгодовая изменчивость поверхностной солености в Карском море по спутниковым данным // Материалы XXVIII Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2022. С. 66–69. <https://doi.org/10.56820/OAOPA.2022.15.73.001>.

7. Маккавеев П. Н., Полухин А. А., Костылева А. В., Проценко Е. А., Степанова С. В., Якубов С. К. Гидрохимические особенности акватории Карского моря летом 2015 г. // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 48–57. <https://doi.org/10.7868/S0030157417010087>.
8. Немировская И. А., Флинт М. В., Артемьев В. А., Храмцова А. В., Халиков И. С. Содержание и состав органических соединений во взвеси и донных осадках в Карском море в период схода сезонного льда // Доклады Академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 498. № 1. С. 46–51. <https://doi.org/10.31857/S2686739721050121>.
9. Погожева М. П., Якушев Е. В., Петров И. Н., Яески Е. А. Экспериментальное изучение влияния таяния вечной мерзлоты на содержание биогенных элементов и тяжелых металлов в морской воде при абразионном разрушении арктического побережья // Арктика: экология экономики. 2021. № 11 (1). Р. 67–75. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-1-67-75>.
10. Полухин А. А., Маккавеев П. Н. Особенности распространения материкового стока по акватории Карского моря // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 25–37.
11. Проценко Е. А. Химический обмен на границе вода–дно в Карском море // Сборник трудов научной конференции «Экосистема Карского моря – новые данные экспедиционных исследований». Москва, 27–29 мая. 2015. С. 75–77.
12. Розанов А. Г. Геохимия донных отложений Карского моря к западу от полуострова Ямал // Океанология. 2015. Т. 55. № 2. С. 291–300. <https://doi.org/10.7868/S0016752517090072>.
13. Современные методы гидрохимических исследований океана / Ред. Бордовский О. К., Иваненков В. Н. М.: ИО РАН, 1992. 200 с.
14. Флинт М. В. 54-й экспедиционный рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» в Карское море // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 677–682.
15. Флинт М. В., Поярков С. Г., Римский-Корсаков Н. А. Экосистемы Российской Арктики-2015 (63-й рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш») // Океанология. 2016. Т. 56. № 3. С. 499–501. <https://doi.org/10.7868/S0030157416030060>.
16. Химия морей и океанов. Сб. ст.: Посвящ. 100-летию С. В. Бруевича / Рос. акад. наук, Ин-т океанологии им. П. П. Ширшова. Отв. ред. О. К. Бордовский, А. Г. Розанов. М.: Наука, 1995. 414 с.
17. Экосистемы морей Сибирской Арктики // Материалы экспедиционных исследований 2015 и 2017 гг. ИО РАН. М.: АПР, 2018. 232 с.
18. Dickson A. G. The measurement of sea water pH // Marine Chemistry. 1993. Vol. 44. No. 2–4. P. 131–142.
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. Vol. 296. P. 664–691.
20. Lewis E. R., Wallace D. W. R. Program developed for CO₂ system calculations. Environmental System Science Data Infrastructure for a Virtual Ecosystem (ESS-DIVE)(United States), 1998. CDIAC-105.
21. Roy R. N., Roy L. N., Vogel K. M., et al. The dissociation constants of carbonic acid in seawater at salinities 5 to 45 and temperatures 0 to 45 C // Marine Chemistry. 1993. Vol. 44. No. 2–4. P. 249–267.

Статья поступила в редакцию 18.10.2023, одобрена к печати 31.01.2024.

Для цитирования: Сеницына В. В., Борисенко Г. В., Полухин А. А. Распределение биогенных элементов на границе вода–дно в поровых и наддонных водах Карского моря и моря Лаптевых // Океанологические исследования. 2024. № 52 (1). С. 121–141. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(1\).6](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(1).6).

**DISTRIBUTION OF BIOGENIC ELEMENTS
AT THE WATER-BOTTOM BOUNDARY IN THE PORE AND SUPER
BOTTOM WATERS OF THE KARA SEA AND THE LAPTEV SEA**

V. V. Sinitsyna¹, G. V. Borisenko¹, A. A. Polukhin¹

¹ *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: val-sinitcina@rambler.ru*

The paper presents data from the 63rd cruise of the R/V “Akademik Mstislav Keldysh” in August–October 2015. The main areas of work included the western part of the Kara Sea, the bays of Novaya Zemlya (Sedova, Oga and Tsivolki), a transect through the Voronin Trench, a transect from the Lena River delta to the continental slope of the Laptev Sea. During the cruise, a chemical analysis of pore and bottom waters was carried out for the content of nitrite, nitrate nitrogen, silicon, phosphates, total alkalinity and pH. The patterns of distribution of silicon and phosphorus concentrations at the water-bottom interface are considered. In the Kara Sea analysis of the data showed that the maximum concentrations of nutrients are located in the upper 10 cm sediment layer, below that concentrations gradually decrease. In all studied bays of Novaya Zemlya, the concentrations of nutrients in the silt waters were lower than on the adjacent shelf. In the Laptev Sea, the content of nitrates in silt waters is higher, and phosphates are lower than in the Kara Sea. Differences in the content of nutrients in the bottom and silt water are associated both with external factors (river runoff) and physical and geological features of the upper sediment layer of the studied areas.

Keywords: Kara Sea, pore water, nutrients, surface bottom sediments

Acknowledgements: The authors thank the program “Ecosystems of the seas of the Siberian Arctic” and M. V. Flint for organizing the 63rd cruise of “Akademik Mstislav Keldysh” to the Kara and Laptev Seas in August–October 2015. The work was supported by the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (theme FMWE-2021-0007).

References

1. Baranov, B. V., M. V. Flint, N. A. Rimsky-Korsakov, S. G. Poyarkov, and K. A. Dozorova, 2021: Sedimentary waves and reconstruction of near-bottom currents in the Novaya Zemlya trough of the Kara Sea. *Reports of the Academy of sciences, Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Earth sciences*, **498** (1), 273–293.
2. Borisenko, G. V., P. N. Makkaveev, and P. A. Stunzhas, 2021: Concentration and diffusion of nutrients in the interpore–bottom watersystem of the Ob river estuary. *Oceanology*, **61** (1), 25–33, <https://doi.org/10.1134/S00014370200600282>.
3. *Chemistry of the seas and oceans*. 1995, Collection of articles: Dedicated. To the 100th anniversary of S. V. Bruevich (Russian Academy of Sciences, Shirshov Institute of Oceanology, Ed. A. K. Bordovsky, A. G. Rozanov). Moscow, Nauka, 414 p.
4. Dickson, A. G., 1993: The measurement of sea water pH. *Marine Chemistry*, **44**, 2–4, 131–142.
5. Ecosystems of the Siberian Arctic seas. 2018, *Materials of expedition research in 2015 and 2017*. IO RAS, Moscow, APR, 232 p.

6. Flint, M. V., 2010: 54th expeditionary voyage of the research vessel “Akademik Mstislav Keldysh” to the Kara Sea. *Oceanology*, **50** (5), 677–682.
7. Flint, M. V., S. G. Poyarkov, and N. A. Rimsky-Korsakov, 2016: Ecosystems of the Russian Arctic-2015 (63rd voyage of the research vessel “Akademik Mstislav Keldysh”), *Oceanology*, **56** (3), 499–501, <https://doi.org/10.7868/S0030157416030060>. EDN VYLYMH.
8. Gordeev, V. V., 1983: *River flow into the ocean and features of its geochemistry*. Moscow, Science, 160 p.
9. Gordeev, V. V., J. M. Martin, I. S. Sidorov, and M. V. Sidorova, 1996: A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean. *Am. J. Sci.*, **296**, 664–691.
10. Gordeev, V. V., A. Yu. Lein, N. A. Belyaev, and M. V. Ivanov, 2014: Distribution of heavy metals in bottom suspension, silt and bottom sediments on the Yenisei profile in the Kara Sea. *Reports of the Academy of Sciences*, **456** (5), 575–580.
11. Kostyleva, A. V., A. A. Polukhin, and S. V. Stepanova, 2020: Hydrochemical Structural Patterns of the Lena River–Laptev Sea Mixing Zone in the Autumn Period, *Oceanology*, **60** (6), 735–741, <https://doi.org/10.1134/S0001437020060053>.
12. Lemeshko, E. M. and M. V. Tsyganova, 2022: Interannual variability of surface salinity in the Kara Sea according to satellite data. *Proceedings of the XXVIII International Symposium “Atmospheric and Oceanic Optics. Atmospheric Physics”*. Tomsk, Publishing house of the IOA SB RAS, 66–69, <https://doi.org/10.56820/OAOPA20221573001>.
13. Lewis, E. R. and D. W. R. Wallace, 1998: Program developed for CO₂ system calculations. Environmental System Science Data Infrastructure for a Virtual Ecosystem (ESS-DIVE) (United States), CDIAC-105.
14. Makkaveev, P. N., A. A. Polukhin, A. V. Kostyleva, E. A. Protsenko, S. V. Stepanova, and S. K. Yakubov, 2017: Hydrochemical features of the Kara Sea in the summer of 2015. *Oceanology*, **57** (1), 48–57, <https://doi.org/10.7868/S0030157417010087>.
15. *Modern methods of hydrochemical studies of the ocean*, 1992, Ed. O. K. Bordovsky, V. N. Ivanenkov, Moscow, IO RAS, 200 p.
16. Nemirovskaya, I. A., M. V. Flint, V. A. Artemyev, A. V. Khramtsova, and I. S. Khalikov, 2021: The content and composition of organic compounds in particulate matter and bottom sediments in the Kara Sea during the period of seasonal ice melting. *Reports of the academy of sciences*, Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Earth Science, **498** (1), 46–51, <https://doi.org/10.31857/S2686739721050121>.
17. Pogozheva, M. P., E. V. Yakushev, I. N. Petrov, and E. A. Yaeski, 2021: Experimental study of the effect of permafrost thawing on the content of biogenic elements and heavy metals in sea water during abrasion destruction of the Arctic coast. *Arktika: ekologiya, ekonomika*, **11** (1), 67–75, <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-1-67-75>.
18. Polukhin, A. A. and P. N. Makkaveev, 2017: Features of the distribution of continental runoff in the Kara Sea. *Oceanology*, **57** (1), 25–37.
19. Protsenko, E. A., 2015: Chemical change at the water-bottom boundary in the Kara Sea. *Proceedings of the scientific conference “Ecosystem of the Kara Sea – new data from expeditionary studies”*, Moscow, May 27–29, 75–77.
20. Roy, R. N., L. N. Roy, and K. M. Vogel et al., 1993: The dissociation constants of carbonic acid in seawater at salinities 5 to 45° and temperatures 0 to 45 °C. *Marine Chemistry*, **44**, 2–4, 249–267.
21. Rozanov, A. G., 2015: Geochemistry of bottom sediments of the Kara Sea to the west of the Yamal Peninsula. *Oceanology*, **55** (2), 291–300, <https://doi.org/10.7868/S0016752517090072>.

Submitted 18.10.2023, accepted 31.01.2024.

For citation: Sinitsyna, V. V., G. V. Borisenko, and A. A. Polukhin, 2024: Distribution of biogenic elements at the water-bottom boundary in the pore and super bottom waters of the Kara Sea and the Laptev Sea. *Journal of Oceanological Research*, **52** (1), 121–141, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(1\).6](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(1).6).