

УДК 550.47(986)

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ЗООПЛАНКТОНА КАРСКОГО МОРЯ И ЗАЛИВОВ ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ НОВОЙ ЗЕМЛИ

© 2016 г. Н. В. Лобус

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

e-mail: lobus.nikolay@gmail.com

Поступила в редакцию 04.08.2015 г.

В статье приводятся результаты изучения элементного состава зоопланктона в бассейне Карского моря. В раздельно сформированных выборках, представленных пробами из открытой акватории моря и заливов Новой Земли (Благополучие и Цивольки), установлена идентичность в характере распределения всего спектра исследованных элементов. Основной химический состав проб представлен органическим углеродом, концентрация которого составляет $49.5 \pm 4.8\%$ массы сухого вещества. Другими, наиболее важными конституционными элементами являются Na, P, S, K, Mg, Ca, их суммарная доля в среднем $4.82 \pm 0.1\%$. Анализ макро- и микроэлементного состава зоопланктона Карского моря и заливов Новой Земли позволил выделить три группы элементов, содержание которых сопоставимо ($C_{\text{орг}}$, K, S, P, Al, Ti, Sc, Cd, Se, Cs, Rb), ниже (Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Sr, Ba, V, Cu, Pb, Cr, Ni, V, Co, Sb, Mo, Ag, Be, Ga, Hg) и выше (Li, As, U) по сравнению со средней концентрацией в зоопланктоне океана.

DOI: 10.7868/S0030157416050087

ВВЕДЕНИЕ

Планктонные сообщества являются ключевыми звеньями глобального биофильтра морей и океана, осуществляющего ассимиляцию растворенных в воде солей (фитопланктон) и трансформацию минеральной и биогенной взвеси (зоопланктон) [6, 11]. Они принимают активное участие в миграции химических элементов, их биодифференциации и биоседиментации в составе осадочного вещества [5, 12]. Данные о содержании макро- и микроэлементов в организмах планктона служат неотъемлемой биогеохимической характеристикой среды и имеют большое теоретическое и прикладное значение при изучении функционирования экосистем, как в природных, так и техногенных условиях [9].

В ряду окраинных морей Северного Ледовитого Океана Карское море занимает особое место и обладает рядом характеристик, влияющих на состояние всех компонентов его экосистемы. Оно принимает в себя крупнейший во всем Арктическом бассейне пресноводный речной сток, характеризуется суровыми климатическими условиями и наличием кросс-шельфовой зональности, наиболее выраженными элементами которой являются гидрологические фронтальные зоны и связанные с ними химические, геохимические и биологические явления в пелагиали и на дне [19]. Крупнейшие месторождения нефти, газа и газового конденсата, открытые на шельфе Карского

моря определяют экономическую значимость данного региона и ставят необходимость всестороннего исследования особенностей функционирования экосистемы до начала их освоения [8].

Цель работы – изучение химического состава зоопланктона Карского моря и заливов Новой Земли.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Зоопланктон для исследований был собран в 128-м рейсе НИС “Профессор Штокман” (август–сентябрь 2014 г.) на акватории Карского моря и двух заливов восточного побережья Новой Земли (Благополучие, Цивольки). Схема расположения станций отбора проб представлена на рис. 1.

Сбор материала производили планктонной сетью в процессе вертикального лова (диаметр входного отверстия 80 см, фильтрующая ячея 500 мкм, скорость подъема 0.6–0.8 м/с) в верхнем 50-метровом слое или “дно–поверхность” при меньших глубинах. Из пробы удаляли представителей желетелых (гребневики, медузы) и других организмов планктона (моллюски, криль, хитогнаты и др.). В итоге исследуемый материал был представлен смесью крупных интерзональных видов копепод *Calanus glacialis*, *Calanus finmarchicus* и *Metridia longa*. Далее зоопланктон концентрировали на капроновой сетке с размером ячеи

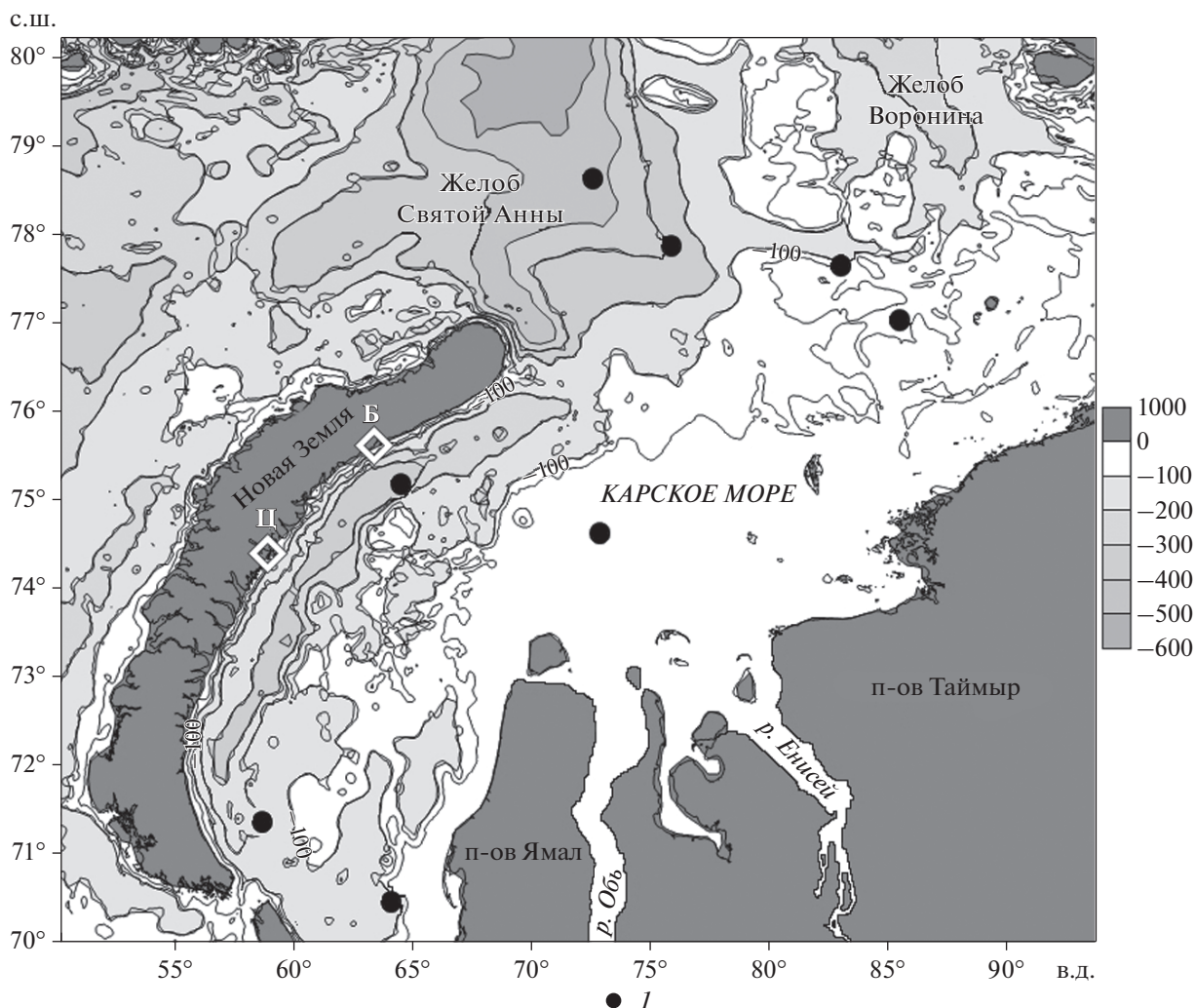


Рис. 1. Карта-схема района исследований. I – Станции отбора проб, Б – залив Благополучие, Ц – залив Цивольки.

500 мкм, аккуратно промывали для удаления частиц детрита, переносили в емкости объемом 3–5 л, заполненные морской водой, предварительно профильтрованной через мембранные фильтры, с диаметром пор 0.45 мкм и выдерживали при температуре окружающей среды не менее 2-х часов. Это позволило снизить вероятность попадания в анализируемые образцы минеральных частиц, входящих в состав фекальных пеллет организмов фильтраторов, так как согласно ранее проведенным исследованиям у разных видов копепоид освобождение кишечника от содержимого происходит за 0.5–1.5 часа [28]. После этого пробу вновь концентрировали на капроновой сетке (500 мкм), дважды промывали бидистиллированной водой (Milli-Q), переносили в стеклянную чашку Петри, высушивали в сушильном шкафу при температуре +50°C в течение 12 часов и до анализа хранили в герметичных контейнерах.

Элементный анализ проб выполнен в Аналитическом сертифицированном испытательном цен-

тре Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН методами ИСП-АЭС и ИСП-МС с использованием спектрометров iCAP-6500 и X-7 соответственно (Thermo Scientific, США) [23]. Разложение образцов производили по стандартной, аттестованной методике в смеси $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ с использованием автоклавной системы МКП-05 НПВФ (Анкон-АТ-2, Россия) [13]. Погрешность определения элементов не превышала 10% отн. Контроль точности аналитических измерений осуществляли путем анализа стандартных образцов ГСО 8921-2007 (Россия), INCT-OBTL-5 и INCT-PVTL-6 (ЕС). Расхождение между аттестованным и определенным значением содержания элементов во всех случаях находилось в пределах доверительных интервалов.

Определение общего углерода осуществляли высокотемпературным сжиганием при +900°C в токе воздуха, а определение общего неорганического углерода осуществляли при +200°C с добав-

Таблица 1. Сравнение макроэлементного состава (%) проб зоопланктона Карского моря и заливов Новой Земли с морским и океанским планктоном

Элемент	Морской зоопланктон		Морской тотальный планктон			Океанский зоопланктон	Океанский тотальный планктон	
	Карское море (<i>n</i> = 8)	Заливы Новой Земли (<i>n</i> = 4)	Белое море [6, 10]	Балтийское море [3]	Японское море [1]	[15]	[15]	[24]
Na	$\frac{1.81}{0.88-3.54}$	$\frac{1.67}{1.25-1.94}$	$\frac{5.3}{4.4-6.4}$	$\frac{3.9}{3.3-4.9}$	3	4	3.5	3.3
P	$\frac{0.83}{0.6-1.21}$	$\frac{0.89}{0.82-1.0}$	–	$\frac{0.25}{0.19-0.31}$	–	1	0.8	0.28
S	$\frac{0.91}{0.7-1.1}$	–	–	–	–	0.6	–	0.83
K	$\frac{0.81}{0.21-1.3}$	$\frac{1.21}{1.1-1.52}$	$\frac{1.2}{0.8-1.7}$	$\frac{1.01}{0.6-1.4}$	–	1	0.9	5.2
Mg	$\frac{0.21}{0.11-0.42}$	$\frac{0.15}{0.13-0.17}$	–	$\frac{0.67}{0.24-1.0}$	–	0.6	1.1	9.4
Ca	$\frac{0.16}{0.05-0.37}$	$\frac{0.08}{0.07-0.09}$	$\frac{1.1}{0.4-1.9}$	$\frac{1.21}{0.58-2.2}$	1.5	2	1.9	1.4
C _{орг}	$\frac{49.8}{44.3-58.8}$	$\frac{48.1}{47.1-48.7}$	–	$\frac{38.0}{37.3-39.1}$	–	40	40	34.5

Примечание. Прочерк – нет данных; над чертой – среднее, под чертой – минимальное и максимальное значение, *n* – количество проб.

лением H_3PO_4 на анализаторе TOC 5000-V-CPH с использованием приставки SSM-5000A (Shimadzu, Япония). Содержание органического углерода ($C_{орг}$) рассчитывали по разности общего и неорганического углерода. Воспроизводимость результатов анализов составляла $\pm 5\%$, погрешность прибора 1%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основной химический состав проб зоопланктона представлен органическим углеродом, содержание которого варьирует от 44.3 до 58.8% (табл. 1). Полученные величины сопоставимы с концентрацией $C_{орг}$ в *Calanus* sp. и *Metridia longa* Баренцева моря, *Neocalanus flemingeri* залива Аляска, *Calanus finmarchicus* залива Св. Лаврентия [26]. Для Карского моря и заливов Новой Земли среднее значение составляет $49.5 \pm 4.8\%$ и совпадает с количественными данными по $C_{орг}$ для арктических и антарктических видов копепод ($47.3 \pm 6\%$) [20]. Для океанского зоопланктона в целом рассматриваемый параметр ниже ($\sim 34-40\%$) [15, 24]. Это может быть связано с особенностями метаболизма холодноводных видов планктона, для которых

характерно запасание липидов в тканях организма [26].

Для ориентировочной оценки содержания натурального сухого органического вещества (ОВ) использовали коэффициент пересчета $1.85 \times C_{орг}$ (%) [3]. Среднее значение составило 91.6%. Приблизительную величину зольности (8.4%) рассчитывали исходя из представлений 100% сухого вещества минус доля ОВ (91.6%). Рассматриваемый параметр характеризуется пространственно-временной изменчивостью и зависит, в первую очередь, от состава анализируемых образцов и методов их сбора. Например, для зоопланктона Двинского и Кандакшского заливов Белого моря он изменялся от 20 до 29% [10]. Однако авторы указанной работы отмечают, что относительно высокая зольность была обусловлена конституционными элементами органического вещества, а также присутствием в непромытой пробе солей морской воды. Несмотря на значительное варьирование показателя, полученные нами расчетные значения хорошо согласуются с литературными данными. Для морского зоопланктона средняя зольность составляет $\sim 10\%$ [22, 26, 31]. Низкое значение ($\sim 8.4\%$) в нашем случае, связано с составом исследуемых проб. Во-первых, они были

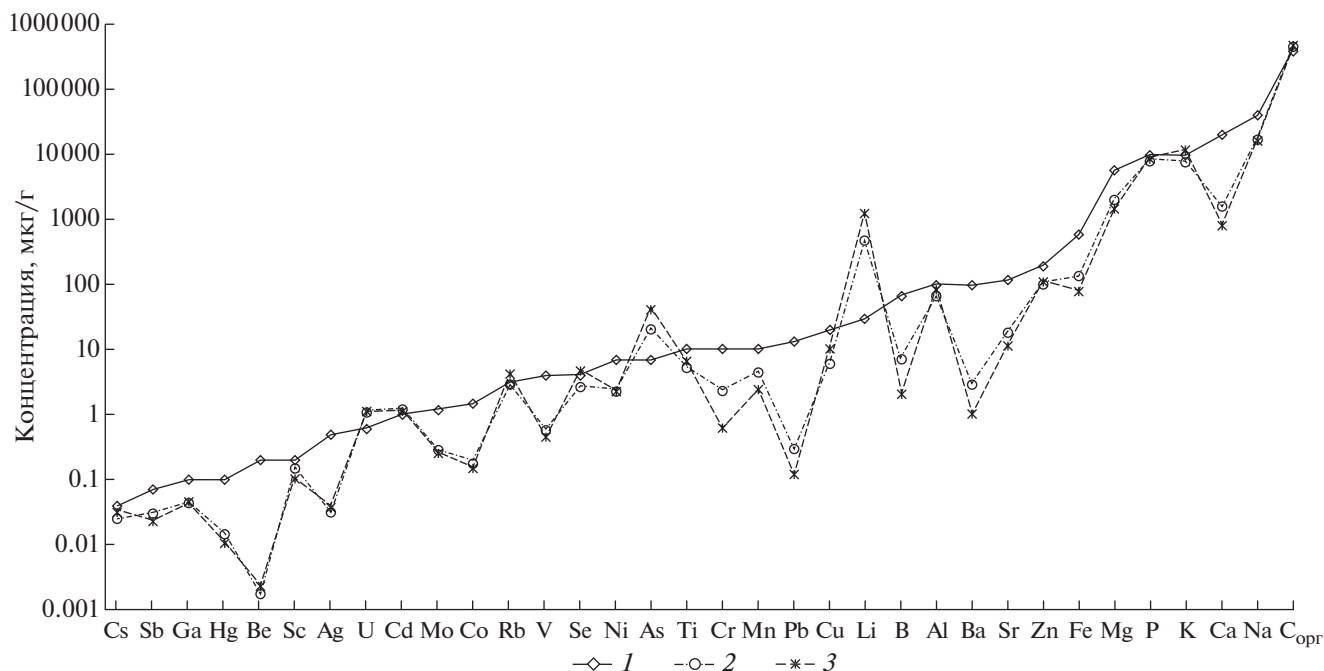


Рис. 2. Элементограмма средних концентраций макро- и микроэлементов в зоопланктоне: 1 – океана [15], 2 – Карского моря, 3 – заливов Новой Земли.

представлены крупными видами копепод, у которых отсутствует минеральный скелет. Концентрация неорганического углерода во всех изученных образцах была меньше 0.001%. Во-вторых, невысокая зольность, в сочетании с очень низкими концентрациями элементов гидролизатов (табл. 2, 3) свидетельствуют о крайне малом содержании минеральной примеси в исследованном материале [9, 10].

Макро- и микроэлементный состав зоопланктона представлен в табл. 1 и 2. Наряду с органическим углеродом другими, наиболее существенными конституционными элементами являются Na, P, S, K, Mg, Ca, величина которых составляет целые и десятые доли процента (суммарно в среднем 4.82%).

При интерпретации вещественного состава живых организмов, используемых в геохимических исследованиях, известную трудность представляет собой выбор условного “эталона” сравнения. Связано это с рядом факторов: особенностями видового состава акваторий, так как у разных групп гидробионтов потребность в одних и тех же элементах может сильно отличаться; существованием организмов со специфическим концентрированием; слабой изученностью пространственной и временной изменчивости содержания элементов в живом веществе [16]. В настоящее время существуют две крупные аналитические сводки, в которых представлены данные по среднему химическому составу океанского планктона [15, 24]. В нашей работе для сравнения

мы использовали значения, предложенные В.С. Савенко, поскольку в его обзоре содержание макро- и микроэлементов в тотальном, фито- и зоопланктоне разделено [15].

Сравнение химического состава зоопланктона Карского моря и заливов Н. Земли представлено на рис. 2 в виде диаграмм распределения элементов. График иллюстрирует, что форма карско-морской и новоземельской кривых в диапазоне от цезия до углерода идентична. Выделяются три группы элементов, содержание которых сопоставимо ($C_{орг}$, K, S, P, Al, Ti, Sc, Cd, Se, Cs, Rb), ниже (Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Sr, Ba, B, Cu, Pb, Cr, Ni, V, Co, Sb, Mo, Ag, Be, Ga, Hg) и выше (Li, As, U) по сравнению со средней концентрацией в зоопланктоне океана.

В первой группе наряду с макрокомпонентами ($C_{орг}$, S, P), входящими в состав биомолекул органического вещества живой материи, находятся литогенные элементы (Sc, Ti, Al). Они плохо накапливаются в биоте и их значительное присутствие в планктонных пробах, как правило, маркирует наличие терригенного материала [3, 9]. Схожесть концентраций данных металлов в карско-морском, новоземельском и океанском зоопланктоне позволяет рассматривать имеющиеся различия средних величин как геохимическую специфику изучаемого региона, исключая влияние попадания примесей минеральной взвеси.

В данную группу также вошли щелочные металлы, такие как Cs, Rb, K. Калий является жизненно необходимым элементом для живых орга-

Таблица 2. Сравнение микроэлементного состава (мкг/г сухой массы) проб зоопланктона Карского моря и заливов Новой Земли с морским и океанским планктоном

Элемент	Морской зоопланктон		Морской тотальный планктон				Океанский зоопланктон	Океанский тотальный планктон	
	Карское море (n = 8)	Заливы Новой Земли (n = 4)	Белое море [6, 9]	Балтийское море [3]	Японское море [1]	[15]		[15]	[24]
Li	$\frac{510}{22.8-1308}$	$\frac{1319}{900-1622}$	–	$\frac{5.9}{3.6-8.0}$	–	30	40	5	
Be	$\frac{0.002}{0.001-0.003}$	$\frac{0.002}{0.001-0.005}$	–	–	–	0.2	0.4	0.0028	
B	$\frac{7.6}{1.86-17.9}$	$\frac{2.15}{1.2-3.1}$	–	–	–	70	50	120	
Al	$\frac{71.9}{15.9-157.5}$	$\frac{86.5}{28.7-182.5}$	–	$\frac{2700}{1800-4300}$	–	100	100	62	
Sc	$\frac{0.16}{0.11-0.21}$	$\frac{0.11}{0.08-0.13}$	$\frac{0.28}{0.09-0.45}$	$\frac{0.76}{0.53-1.1}$	0.19	0.2	0.2	0.07	
Ti	$\frac{5.53}{2.9-14.2}$	$\frac{6.75}{3.1-9.5}$		$\frac{350}{170-570}$	–	10	50	11.0	
V	$\frac{0.6}{0.27-0.92}$	$\frac{0.47}{0.27-0.6}$	$\frac{3.8}{3-4}$	$\frac{8.5}{7-10}$	–	4	4	3.5	
Cr	$\frac{2.43}{0.4-13.1}$	$\frac{0.61}{0.38-0.77}$	$\frac{218.3}{59-620}$	$\frac{27.3}{10-48}$	54.7	10	10	1.8	
Mn	$\frac{4.7}{2.27-7.3}$	$\frac{2.5}{1.54-4.2}$	$\frac{62.5}{50-80}$	$\frac{600}{110-900}$	–	10	10	20	
Fe	$\frac{142.1}{37.8-279.7}$	$\frac{84.7}{47.6-160.7}$	$\frac{1585}{830-2460}$	$\frac{3600}{2700-4700}$	3009	600	800	160	
Co	$\frac{0.19}{0.1-0.39}$	$\frac{0.16}{0.11-0.2}$	$\frac{0.86}{0.6-1.5}$	$\frac{18}{6-24}$	0.23	1.5	1.5	0.43	

Таблица 2. Продолжение

Элемент	Морской зоопланктон		Морской тотальный планктон				Океанский зоопланктон	Океанский тотальный планктон	
	Карское море (n = 8)	Заливы Новой Земли (n = 4)	Белое море [6, 9]	Балтийское море [3]	Японское море [1]	[15]		[15]	[24]
Ni	$\frac{2.4}{1.3-7.9}$	$\frac{2.37}{2-3.2}$	$\frac{4.1}{3.2-6.0}$	$\frac{35}{20-60}$	16.2	7	10	1.4	
Cu	$\frac{6.3}{3.9-8.5}$	$\frac{11.1}{4.6-21.4}$	$\frac{75.3}{33-142}$	$\frac{21}{5-30}$	7	20	40	12	
Zn	$\frac{106.6}{80-152.4}$	$\frac{114.9}{94.3-127.3}$	$\frac{360}{325-386}$	$\frac{140}{<20-204}$	8.7	200	300	39	
Ga	$\frac{0.045}{0.026-0.07}$	$\frac{0.045}{0.03-0.06}$	1	—	—	0.1	0.2	0.5	
As	$\frac{20.9}{10.5-41.2}$	$\frac{45.4}{21.2-59.4}$	$\frac{12.3}{7-17}$	$\frac{4.2}{2.7-5.1}$	1.16	7	10	15	
Se	$\frac{2.8}{2.1-4.5}$	$\frac{4.9}{3.3-6.3}$	$\frac{0.45}{0.3-0.6}$	$\frac{1.8}{1.2-2.0}$	—	4	4	0.06	
Rb	$\frac{3.1}{0.82-5.46}$	$\frac{4.3}{3.9-5.3}$	$\frac{5.75}{3-7}$	$\frac{6}{3.8-9.0}$	—	3	3	1.8	
Sr	$\frac{19.1}{8.0-36.2}$	$\frac{11.5}{9.1-12.5}$	$\frac{110}{95-129}$	$\frac{190}{80-400}$	—	120	300	1100	
Y	$\frac{0.037}{0.009-0.15}$	$\frac{0.029}{0.013-0.06}$	$\frac{0.33}{0.1-1.0}$	—	—	—	4	—	
Mo	$\frac{0.3}{0.12-0.44}$	$\frac{0.26}{0.25-0.28}$	$\frac{0.18}{0.1-0.3}$	$\frac{10}{4.3-13}$	13.1	1	1	0.39	
Ag	$\frac{0.031}{0.008-0.05}$	$\frac{0.04}{0.03-0.05}$	—	$\frac{2.7}{0.98-4.8}$	—	0.5	0.4	0.22	

Таблица 2. Окончание

Элемент	Морской зоопланктон		Морской тотальный планктон				Океанский зоопланктон	Океанский тотальный планктон	
	Карское море (n = 8)	Заливы Новой Земли (n = 4)	Белое море [6, 9]	Балтийское море [3]	Японское море [1]	[15]		[15]	[15]
Cd	$\frac{1.25}{0.1-2.1}$	$\frac{1.17}{0.6-1.9}$	$\frac{2.4}{1.7-3.2}$	$\frac{2}{1-3}$	6.7	1	3	0.72	
Sb	$\frac{0.032}{0.007-0.05}$	$\frac{0.023}{0.018-0.027}$	$\frac{1.5}{0.3-3.2}$	$\frac{0.5}{0.28-0.68}$	—	0.07	0.1	0.16	
Cs	$\frac{0.026}{0.008-0.04}$	$\frac{0.035}{0.03-0.04}$	$\frac{0.25}{0.1-0.6}$	$\frac{0.32}{0.25-0.43}$	1.06	0.04	0.04	0.072	
Ba	$\frac{3.0}{0.43-1.4}$	$\frac{1.0}{0.52-1.5}$	$\frac{22}{6-47}$	$\frac{800}{700-900}$	—	100	100	19	
Hg	$\frac{0.016}{0.006-0.023}$	$\frac{0.011}{0.01-0.012}$	$\frac{0.034}{0.026-0.051}$	$\frac{0.24}{0.15-0.35}$	—	0.1	0.2	0.03	
Tl	$\frac{0.004}{0.001-0.008}$	$\frac{0.004}{0.003-0.005}$	—	—	—	—	—	—	
Pb	$\frac{0.31}{0.03-0.54}$	$\frac{0.12}{0.09-0.18}$	$\frac{16.6}{9.1-28.2}$	$\frac{25}{20-30}$	10.2	13	20	8.7	
Bi	$\frac{0.001}{0.001-0.003}$	$\frac{0.002}{0.001-0.002}$	—	—	—	—	—	—	
Th	$\frac{0.01}{0.004-0.03}$	$\frac{0.01}{0.004-0.02}$	$\frac{0.21}{0.06-0.28}$	$\frac{0.87}{0.53-1.4}$	0.44	—	0.1	0.1	
U	$\frac{1.17}{0.57-1.86}$	$\frac{1.19}{1.0-1.5}$	—	$\frac{0.41}{0.28-0.56}$	—	0.6	0.6	0.8	

Примечание. Прочерк — нет данных; над чертой — среднее, под чертой — минимальное и максимальное значение, n — количество проб.

низмов, и его содержание в тканях и жидкостях тела у многих таксономических групп поддерживается в сравнительно узких пределах при значительных изменениях внешних условий. Для Cs и Rb у гидробионтов отсутствуют механизмы гомеостаза. Основным фактором среды, определяющим накопление рубидия, является не его собственная концентрация в воде, а ее отношение к концентрации калия. Оба элемента-аналога (Rb и K) накапливаются взаимосвязано и калий можно рассматривать как макроноситель рубидия. Накопление цезия более специфично и обусловлено, в частности типом питания и осморегуляции [18].

Вторая группа представлена большинством из проанализированных нами элементов. Полученные данные демонстрируют, что среднее содержание Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Sr, Ba, B, Cu, Pb, Cr, Ni, V, Co, Sb, Mo, Ag, Be, Ga, Hg в карскоморских и новоземельских пробах идентично и лишь для B, Ba, Cr, Mn, Pb и Cu установлены незначительные различия (рис. 2). При этом зоопланктон в открытой части моря обогащен B, Ba, Cr, Mn и Pb, а в заливах – Cu. Для указанных шести элементов также интересно сравнить ряды накопления: Pb < Cr < Ba < Mn < Cu < B (для Карского моря), Pb < Cr < Ba < B < Mn < Cu (для заливов Новой Земли).

В целом важно отметить, что концентрация всех элементов данной группы существенно ниже по сравнению со средними значениями для океанского зоопланктона (табл. 1, 2, рис. 2). Причин формирования таких отрицательных геохимических отклонений может быть несколько.

Во-первых, отсутствие у зоопланктона механизмов избирательного питания позволяет ему перерабатывать разнообразный по генезису взвешенный материал. На химический режим Карского моря существенное воздействие оказывает крупнейший во всем Арктическом бассейне пресноводный речной сток Оби и Енисея, тогда как формирование состава океанской взвеси определяется прямым влиянием эолового источника поставки вещества. Обогащение взвеси океана рядом тяжелых металлов (таких как Pb, V, Sb, Hg) отражает вклад аэрозолей, для которых также отмечается более высокое содержание указанных элементов, среди которых свинец имеет преимущественно техногенное происхождение [3, 14]. Во-вторых, в любой экосистеме эффективность вовлечения химических элементов в биогенный круговорот зависит от интенсивности биологических процессов, протекающих в ней. Карское море отличается суровыми климатическими условиями. Низкие температуры и продолжительность ледового периода в течение большей части года ограничивают развитие сообществ фитопланктона. Несмотря на выраженную гидрофизическую и гидрохимическую зональность, опре-

Таблица 3. Концентрация редкоземельных элементов (мкг/г) в зоопланктоне Карского моря и заливов Новой Земли

Элемент	Карское море	Заливы Новой Земли
La	$\frac{0.051}{0.02-0.175}$	$\frac{0.034}{0.014-0.071}$
Ce	$\frac{0.106}{0.04-0.4}$	$\frac{0.064}{0.025-0.143}$
Pr	$\frac{0.011}{0.004-0.04}$	$\frac{0.007}{0.003-0.016}$
Nd	$\frac{0.044}{0.013-0.17}$	$\frac{0.03}{0.014-0.065}$
Sm	$\frac{0.009}{0.002-0.037}$	$\frac{0.006}{0.002-0.013}$
Eu	$\frac{0.0016}{0.0003-0.005}$	$\frac{0.0014}{0.0005-0.003}$
Gd	$\frac{0.009}{0.002-0.039}$	$\frac{0.006}{0.003-0.013}$
Tb	$\frac{0.002}{0.0005-0.006}$	$\frac{0.003}{0.001-0.004}$
Dy	$\frac{0.008}{0.002-0.031}$	$\frac{0.006}{0.003-0.012}$
Ho	$\frac{0.0014}{0.0004-0.006}$	$\frac{0.001}{0.0006-0.002}$
Er	$\frac{0.004}{0.001-0.016}$	$\frac{0.003}{0.002-0.007}$
Tm	$\frac{0.0006}{0.0002-0.002}$	$\frac{0.0006}{0.0003-0.001}$
Yb	$\frac{0.004}{0.001-0.013}$	$\frac{0.004}{0.002-0.008}$
Lu	$\frac{0.0006}{0.0002-0.0009}$	$\frac{0.0006}{0.0003-0.0012}$
ΣРЗЭ	0.252	0.166

Примечание. Над чертой – среднее, под чертой – минимальное и максимальное значение.

деляющую разнообразие условий формирования первичной продукции (ПП), Карское море характеризуется как олиготрофный водоем с величинами ПП в водном столбе <100 мгС/м² в сутки [21].

Третья группа содержит три элемента (Li, As, U) среди которых самые большие геохимические отклонения наблюдаются для лития. Для данного щелочного металла также отмечен максималь-

ный разброс значений (от 22.8 до 1630 мкг/г с.м.) (табл. 2). Литий относится к элементам, широко распространенным, но рассеянным в природе. В процессах выветривания он накапливается в глинистых минералах и мигрирует в составе взвешенного вещества речного стока. Ионный вынос составляет всего 11% от общего поступления Li в океан [4]. Литий не является биофильным элементом и по разным оценкам в среднем составе живого вещества его содержание изменяется от 1 до $10 \times 10^{-5}\%$. Среди морских бурых водорослей и высших цветковых растений обнаружены специфические концентраторы данного металла [4, 18]. Однако необходимо отметить, что в литературе рассматриваются преимущественно вопросы геохимии лития в эндогенных и экзогенных процессах [17]. Количество данных о его содержании в гидробионтах, закономерностях накопления у разных систематических групп крайне мало, поэтому дать однозначный ответ о причинах столь высоких концентраций Li в копеподном зоопланктоне Карского моря и заливов Новой Земли, в настоящее время затруднительно.

Среди элементов, для которых установлено положительное геохимическое отклонение также, необходимо, отметить мышьяк. Его содержание в карскоморских и новоземельских пробах составляет ~21 и 45 мкг/г сухой массы соответственно при среднем значении для зоопланктона океана 7 мкг/г.

В природных водах As находится в соединениях с различной степенью окисления, среди которых в аэробных условиях преобладает арсенат (As(V) в форме $H_2AsO_4^-$ и $HAsO_4^{2-}$), а в анаэробных арсенит (As(III) в форме $H_3AsO_3^0$ и $H_2AsO_3^{-}$) [27]. Являясь молекулярным аналогом фосфатов, арсенат вступает в биохимические реакции и входит в клеточные структуры морской биоты, поэтому наиболее эффективное аккумуляирование растворенных форм мышьяка (As^P) в водном столбе осуществляется фитопланктоном. При низком содержании фосфатов в среде интенсивность поглощения As^P фитопланктоном может приводить к существенному снижению его концентрации в верхнем фотическом слое. Для зоопланктона характерен другой, преимущественно, алиментарный (трофический) путь накопления мышьяка, поскольку в условиях низкого содержания As^P , свойственного морским экосистемам, прямое поглощение из воды считается не существенным [29]. В ранее проведенном исследовании выявлено обогащение осадков Карского моря мышьяком [25]. Авторы указанной работы связывают это явление не с антропогенным загрязнением, а с постседиментационными, диагенетическими процессами в Fe–Mn цикле. Поэтому повышенное содержание As в различных компонентах экосистемы

Карского моря, вероятно, является геохимической спецификой рассматриваемого региона и определяется протеканием естественных природных процессов.

Для исследованных проб зоопланктона также установлено более высокое содержание урана. Его средняя концентрация (1.2 мкг/г) в 2 раза выше по сравнению с величиной, характерной для зоопланктона океана (0.6 мкг/г) (табл. 2). В водной среде гидробионты способны осуществлять интенсивное прижизненное биохимическое концентрирование U, приводящее к значительному обогащению его содержания по сравнению с окружающей средой [16]. В организме животных накопление U связано, главным образом, с органическим веществом. Уран образует комплексные и хелатные соединения и способен селективно поглощаться аденозинтрифосфатом, оксидикарбонными кислотами. Он также обнаружен в виде уранил-бикарбонатного и уранил-белкового комплексов [2].

Содержание редкоземельных элементов (РЗЭ) в зоопланктоне Карского моря и заливов Новой Земли сопоставимо с незначительным увеличением разности при переходе от тяжелых лантаноидов к легким (табл. 3). Суммарная концентрация РЗЭ составляет 0.252 и 0.166 мкг/г сухого вещества соответственно. Закономерности поведения РЗЭ в живом веществе практически не изучены, однако, в целом, интенсивность их биологического поглощения невелика. Имеются данные, свидетельствующие, что типы составов РЗЭ в растениях отвечают особенностям их составов в фильтрующих пресных водах [4]. Принимая во внимание, что доминирующим источником поставки РЗЭ в океан является твердый речной сток (94%), их содержание в пробах зоопланктона, вероятно, отражает состав РЗЭ взвешенного вещества исследованных акваторий [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований определено содержание макро- (Na, P, S, K, Mg, Ca, $C_{орг}$), микро- (Li, Be, B, Al, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Se, Rb, Sr, Y, Mo, Ag, Cd, Sb, Cs, Ba, Hg, Tl, Pb, Bi, Th, U) и редкоземельных элементов (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) в зоопланктоне Карского моря и заливов восточного побережья Новой Земли (Благополучие и Цивольки).

Основной химический состав проб представлен органическим углеродом ($49.5 \pm 4.8\%$). Другими, наиболее важными конституционными элементами являются Na, P, S, K, Mg, Ca. Их суммарная доля в среднем составляет $4.82 \pm 0.1\%$. Для зоопланктона Карского моря и заливов Новой Земли установлена идентичность в характере

распределения большинства проанализированных элементов и только для Li, B, Ba, Cr, Mn, Cu, As и Pb выявлены незначительные различия. В открытой части моря зоопланктон обогащен B, Ba, Cr, Mn и Pb, в заливах – Li, Cu, As.

Сравнительный анализ полученных данных позволил выделить три группы элементов, содержание которых сопоставимо ($C_{орг}$, K, S, P, Al, Ti, Sc, Cd, Se, Cs, Rb), ниже (Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Sr, Ba, V, Cu, Pb, Cr, Ni, V, Co, Sb, Mo, Ag, Be, Ga, Hg) и выше (Li, As, U) по сравнению со средней концентрацией в зоопланктоне океана. Выявленные особенности отражают специфику биогеохимических процессов аккумуляции и биогенной миграции рассматриваемых элементов в изученном регионе.

Часть работы, связанная с определением основного химического состава проб зоопланктона, выполнена по государственному заказу № 0149-2014-0036, часть работы, связанная с изучением содержания и особенностей распределения макро- и микроэлементов в зоопланктоне Карского моря и заливов Новой Земли, выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-05-05003 Кар_а и № 16-05-00037).

Автор благодарит сотрудников лаборатории экологии планктона с.н.с., к.б.н. А.В. Дрица и н.с. К.А. Соловьева за консультации и помощь в сборе материала. Особая благодарность начальнику экспедиции д.б.н. М.В. Флинту за проявленный интерес к работе и проф. д.г.-м.н. Е.А. Романкевичу за ценные замечания, высказанные в процессе подготовки публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аникеев В.В., Дударев О.В., Касаткина А.П. и др.* Влияние терригенных и биогенных факторов на формирование седиментационных потоков химических элементов в прибрежной зоне Японского моря // *Геохимия*. 1996. № 1. С. 59–72.
2. *Батулин Г.Н.* Уран в современном морском осадкообразовании. М.: Атомиздат, 1975. 152 с.
3. *Батулин Г.Н., Емельянов Е.М., Стрюк В.Л.* О геохимии планктона и взвеси Балтийского моря // *Океанология*. 1993. Т. 33. № 1. С. 126–132.
4. *Гавриленко В.В., Сахоненок В.В.* Основы геохимии редких литофильных металлов. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1986. 172 с.
5. *Демина Л.Л.* Количественная оценка роли живого вещества в геохимической миграции микроэлементов в океане // *Геохимия*. 2015. № 3. С. 234–251.
6. *Демина Л.Л., Леонова Г.А., Бобров В.А. и др.* Микроэлементы в организмах планктона Белого моря // *Система Белого моря*. Т. II / Ред. Лисицын А.П. М.: Научный мир, 2012. С. 579–605.
7. *Дубинин А.В.* Геохимия редкоземельных элементов в океане. М.: Наука, 2006. 360 с.
8. *Лаверов Н.П., Дмитриевский А.Н., Божьявленский В.И.* Фундаментальные аспекты освоения нефтегазовых ресурсов Арктического шельфа России // *Арктика*. Экология и экономика. 2011. № 1. С. 26–37.
9. *Леонова Г.А., Бобров В.А.* Геохимическая роль планктона континентальных водоемов Сибири в концентрировании и биоседиментации микроэлементов. Новосибирск: Гео, 2012. 314 с.
10. *Леонова Г.А., Бобров В.А., Богуш А.А. и др.* Концентрирование химических элементов зоопланктоном Белого моря // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 1. С. 60–77.
11. *Лисицын А.П.* Маргинальные фильтры и биофильтры Мирового океана // *Океанология на старте 21-го века* / Ред. Верещака А.Л. М.: Наука, 2008. С. 159–224.
12. *Лисицын А.П.* Процессы океанской седиментации. М.: Наука, 1978. 392 с.
13. *Орлова В.А.* Аналитические автоклавы. Автоклавная пробоподготовка в химическом анализе. М.: ЦИНАО, 2003. 104 с.
14. *Савенко В.С.* Средний элементарный химический состав океанского аэрозоля // *Докл. АН СССР*. 1988. Т. 299. № 2. С. 465–468.
15. *Савенко В.С.* Элементный химический состав океанского планктона // *Геохимия*. 1989. № 8. С. 1084–1089.
16. *Саенко Г.Н.* Металлы и галогены в морских организмах. М.: Наука, 1992. 200 с.
17. *Солодов Н.А., Балашов Л.С., Кременецкий А.А.* Геохимия лития, рубидия и цезия. М.: Недра, 1980. 233 с.
18. *Флейшман Д.Г.* Щелочные элементы и их радиоактивные изотопы в водных экосистемах. Л.: Наука, 1982. 160 с.
19. *Флинт М.В.* 54-й экспедиционный рейс научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” в Карское море // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 677–682.
20. *Conover R.J., Huntley M.* Copepods in ice-covered seas – distribution, adaptations to seasonally limited food, metabolism, growth patterns and life cycle strategies in polar-seas // *J. of Marine Systems*. 1991. V. 2. P. 1–41.
21. *Demidov A.B., Mosharov S.A., Makkaveev P.N.* Patterns of the Kara Sea primary production in autumn: Biotic and abiotic forcing of subsurface layer // *J. of Marine Systems*. 2014. V. 132. P. 130–149.
22. *Donnelly J., Torres J.J., Hopkins T.L. et al.* Chemical composition of Antarctic zooplankton during austral fall and winter // *Polar Biology*. 1994. V. 14. P. 171–183.
23. *Karandashev V.K., Turanov A.N., Orlova T.A. et al.* Use of the inductively coupled plasma mass spectrometry for element analysis of environmental objects // *Inorganic Materials*. 2008. V. 44. P. 1491–1500.
24. *Li Y.H.* Distribution patterns of the elements in the ocean: A synthesis // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1991. V. 55. P. 3223–3240.
25. *Loring D.H., Dahle S., Naes K. et al.* Arsenic and other Trace Metals in Sediments from the Kara Sea and Ob

- and Yenisey Estuaries, Russia // *Aquatic Geochemistry*. 1998. V. 4. P. 233–252.
26. *Mauchline J.* The biology of Calanoid Copepods. London: Academic Press Limited, 1998. 710 p.
27. *Oremland R.S., Stolz J.F.* The Ecology of Arsenic // *Science*. 2003. V. 300. P. 939–944.
28. *Pasternak A., Arashkevich E., Reigstad M. et al.* Dividing mesozooplankton into upper and lower size groups: Applications to the grazing impact in the Marginal Ice Zone of the Barents Sea // *Deep-Sea Res. II*. 2008. V. 55. P. 2245–2256.
29. *Sanders J.G.* Arsenic cycling in marine systems // *Marine Environ. Research*. 1980. V. 3. P. 257–266.
30. *Ventura M.* Linking biochemical and elemental composition in freshwater and marine crustacean zooplankton // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2006. V. 327. P. 233–246.
31. *Zooplankton methodology manual* / Eds. Harris R.P. et al. London: Academic Press Limited, 2000. 670 p.

Chemical Composition of Zooplankton from the Kara Sea and the Bays of the Eastern Coastline of Novaya Zemlya

N. V. Lobus

Chemical composition of zooplankton of the open Kara Sea and two bays of Novaya Zemlya was determined. The results revealed similar distribution of major, trace and rare-earth elements in zooplankton from the aquatic environments that were studied. The organic carbon comprised $49.5 \pm 4.8\%$ of the dry zooplankton weight, while the summed content of other major elements (Na, P, S, K, Mg, and Ca) made up to 4.82%. The elements studied were arranged into three groups by the content level: K, S, P, Al, Ti, Sc, Cd, Se, Cs, Rb and C_{org} corresponded to the average chemical composition of ocean zooplankton, while the contents of Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Sr, Ba, B, Cu, Pb, Cr, Ni, V, Co, Sb, Mo, Ag, Be, Ga and Hg were lower, and Li, As, and U significantly exceeded the respective reference values.