© Демина Л.Л., Соломатина А.С., Абызова Г.А., 2019, Океанологические исследования, 2019, Том 47, № 4, С. 62–75

УДК 551.465:551.35. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(4).4

ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ЗООПЛАНКТОННЫХ ОРГАНИЗМАХ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Демина Л.Л., Соломатина А.С., Абызова Г.А.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36, e–mail: l_demina@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.08.2019, одобрена к печати 21.11.2019

Зоопланктон занимает центральную роль в передаче вещества и энергии от первичных продуцентов до организмов высокого трофического уровня, а кроме того служит важнейшим компонентом осадочного материала, поставляющим органическое вещество на дно морских бассейнов. В работе приводятся новые данные по распределению ряда тяжелых металлов и мышьяка в зоопланктоне рода Calanus, собранном в июле–августе 2017 г. в северо-восточной, восточной и центральной частях Баренцева моря. Показано, что на пространственное распределение металлов в организмах зоопланктона оказывают влияние биотические факторы экосистемы, а также гидрологические и геохимические параметры среды обитания. В зоопланктоне арктической водной массы к юго-востоку от Земли Франца-Иосифа отмечено повышенное содержание эссенциальных тяжелых металлов Cu, Zn и Cr по сравнению с прибрежной и атлантической водными массами. Зоопланктон из центральной части моря (атлантическая водная масса), где продукция фитопланктона понижена, характеризуется наиболее низкими концентрациями большинства элементов (Ni, Cu, Zn, As и Pb). Наиболее высокие концентрации установлены как для эссенциальных тяжелых металлов (Zn и Cu), так и для токсичного металлоида As, что может свидетельствовать о неселективной биоаккумуляции микроэлементов копеподами.

Ключевые слова: тяжелые металлы, мышьяк, зоопланктон, копеподы, биоаккумуляция, Баренцево море

Введение

Биоконцентрирование большинства двухвалентных металлов является характерной чертой всех морских организмов, обусловленной их физиологическими и биохимическими потребностями. Тяжелые и переходные металлы, в частности, цинк, медь, железо, марганец, входящие в состав активных центров ферментов и металлоэнзимов, служат катализаторами биохимических процессов, участвуя в процессах фотосинтеза, дыхания, фиксации азота и др. В океанской воде значительная часть тяжелых металлов находится в форме двухвалентных гидрофильных катионов (Bruland, 1983), а клеточные мембраны гидрофобны, поэтому металлы могут проникать в цитоплазму клетки с помощью носителей, которыми служат органические лиганды – металлопротеины, аминокислоты, цистеины, глицин, которыми богата морская вода (Williams, 1981; Романкевич, 1988; Simkiss et al., 1989). В соответствии с теорией акад. А.П. Лисицына о биодифференциации, сообщества морских организмов создают в морях и океанах трехступенчатую систему биологических фильтров: 1) глобальный биофильтр-1: первичное биопродуцирование фитоплан-

ктона в зоне фотосинтеза; 2) глобальный биофильтр-2: вторичное биопродуцирование зоопланктона и вертикальные потоки осадочного материала; 3) глобальный биофильтр-3: трансформация осадочного материала в поверхностном слое донных осадков бентосом (Лисицын, 2001, 2004, 2008). Важность изучения зоопланктона обусловлена тем, что он занимает центральную роль в передаче вещества и энергии от первичных продуцентов до организмов высокого трофического уровня. Высокое содержание органического углерода ($C_{орг}$) в арктических копеподах, в среднем 47% (или 94% органического вещества) (Conover, Huntley, 1991), позволяет считать их важнейшим компонентом осадочного материала, поставляющим органическое вещество на дно бассейна (Fowler, Knauer, 1986; Fisher, Wente, 1993; Лисицын, 2014). Основным механизмом транспорта осадочного вещества (ОВ) в арктических бассейнах служат пищевые цепочки, фекальные пеллеты и вертикальные потоки осадочного материала (Wassmann et al., 2006; Лисицын, 2014). Отличительной особенностью Баренцева моря, является то, что ОВ поступает в этот бассейн с водными массами из Атлантики, аэрозолями и материалом ледового разноса и таяния льда (Lisitzin, 2002); при этом вдоль кромки тающего льда наблюдаются повышенные концентрации взвешенных частиц и связанных с ними и загрязняющих веществ (AMAP, 2007; Mohan et al., 2018).

В Баренцевом море, составляющем лишь около 7% общей площади арктических морей, сосредоточена основная часть морских биоресурсов, которая создает базу для обширной хозяйственной деятельности (Гуревич, 2002). Обилие разного рода биоресурсов обусловлено тем, что относительно теплая атлантическая вода, поступающая с Гольфстримом, создает благоприятные условия для повышенной биологической продуктивности. Зоопланктон в данной экосистеме является важнейшим компонентом диеты промысловых гидробионтов (Зенкевич, 1963). Суммарная первичная продукция Баренцева моря, вычисленная по спутниковым наблюдениям и средним величинам первичной продукции в поверхностных водах арктических морей (для периода апрель–сентябрь), составляет около 40 млн т С/год (Кузнецов, Шошина, 2002; Виноградов, Шушкина, 2001). Для сублитторали Баренцева моря характерно обилие донных фитоценозов – водорослей-макрофитов, микрофитобентоса, криофлоры, что обусловлено особыми условиями потока и трансформации биогенных элементов (Макаревич, 2012). Важной составляющей биомассы зоопланктона в арктических водах являются ракообразные – веслоногие рачки рода Calanus, диета которых базируется на фитопланктоне. Вследствие особенностей их метаболизма в тканях северных видов зоопланктона, а также более крупных *Calanus hyperboreus* накапливаются жировые капли (Mauchline, 1998). Для липидной фракции органического вещества зоопланктона океана, составляющей в среднем 15% $C_{орг}$ (Богоров, 1974; Романкевич, 1988) характерно накопление ряда микроэлементов, включая тяжелые металлы (Саенко, 1989). В Баренцево море тяжелые металлы поступают из Атлантического океана с теплыми водами Нордкапского течения, в результате трансграничного атмосферного переноса, с речным стоком, а также при таянии дрейфующих льдов и ледников. Выяснено, что концентрации растворенных

тяжелых металлов снижаются от западной части моря к восточной (Матишов и др., 1997). По результатам анализа больших массивов данных показано, что по ряду загрязняющих веществ воды Баренцева моря оказались чище, чем воды других европейских морей (Новиков, Жилин, 2016). В работе (Zauke, Schmalenbach, 2005) для зоопланктона Баренцева моря установлено фоновое содержание Pb (0.4 мкг/г), а также выявлены значительные межвидовые неоднородности в пространственном распределении некоторых тяжелых металлов, а именно, высокие концентрации Cd в декаподах и гипериидных амфиподах, и минимальные – в эуфаузидах, тогда как для Cu характерны пониженные концентрации в копеподах, а высокие – в эуфаузидах и декаподах. При этом намечена сезонная изменчивость накопления кадмия в копеподах, обусловленная изменением пищевой стратегии.

Целью данной работы является изучение распределения тяжелых металлов и металлоида мышьяка в наиболее массовых видах рода Calanus в Баренцевом море.

Материалы и методы

Материал для исследования был собран в июле 2017 г. во время 68 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Баренцевом море. На рис. 1 показан район отбора проб зоопланктона на тринадцати станциях, расположенных в северо-восточной, восточной и центральной частях Баренцева моря, находящихся под влиянием теплых (Мурманского и Новоземельского) и холодных (Центральное и Персея) течений (Терещенко, 1999; Дворецкий, Дворецкий, 2010). В арктической водной массе севернее 78°с.ш. расположены ст. 5562–5565; эта область, а также прибрежная

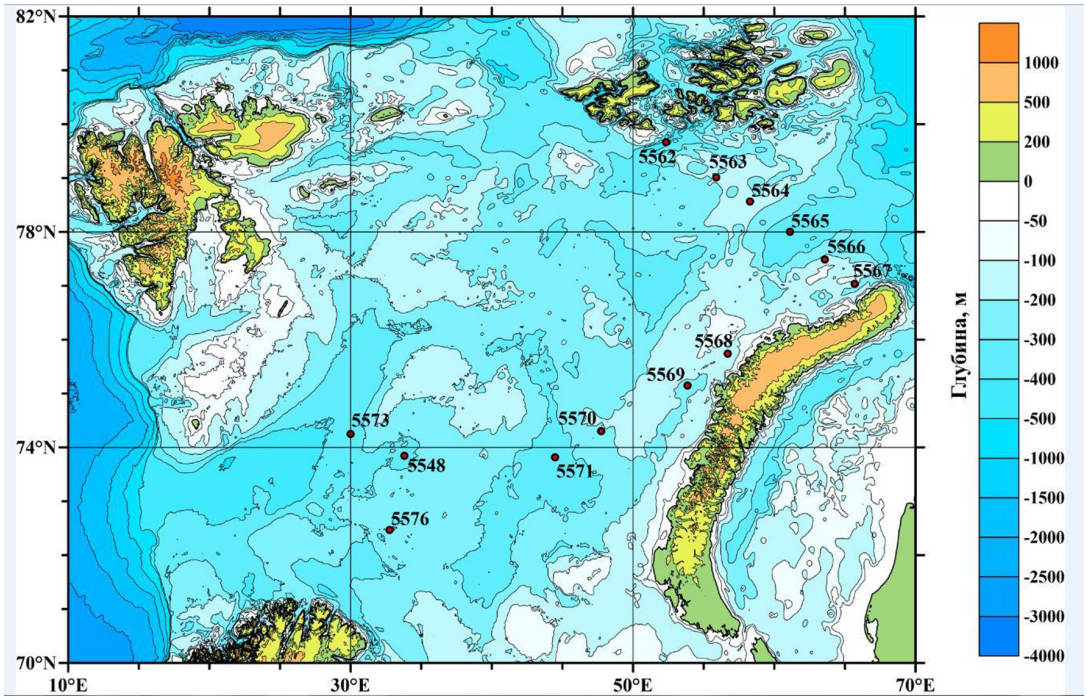

Рис. 1. Схема пробоотбора зоопланктона в Баренцевом море в 68 рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (июль–август 2017 г.).

водная масса (ст. 5566–5569) характеризуются высокими концентрациями взвеси (Зернова и др., 2003; Politova et al., 2010) и биомассой зоопланктона (Дворецкий, Дворецкий, 2010). Зоопланктон из атлантической водной массы был выловлен на ст. 5548, 5570–5573, то есть в открытых районах моря, где понижена первичная продукция вод (Кузнецов, Шошина, 2002) и отмечено пятнистое распределение взвеси (Politova et al., 2010; 2012).

Сбор зоопланктонных проб происходил с помощью планктонной сети Джеди с ячеей 180 мкм и диаметром входного отверстия 37 см, длина фильтрующего конуса около 2 м. Облавливалась толща воды от поверхности до дна (300–400 м), слои облова выбирались по измеренным изоклинам температуры, кислорода и прозрачности. Основной упор был сделан на изучение наиболее продуктивного верхнего 100–200-м слоя, где отмечаются скопления планктона (Богоров, 1974). По завершении облова зоопланктон, собранный на сетке, промывали небольшим количеством (около 50 мл) деионизованной воды и выкладывали на плотные фильтры («синяя лента») для последующего просушивания в термостате (при температуре не выше 70°С) в судовой лаборатории. Высушенные пробы зоопланктона хранили в герметичных пластиковых пакетах. В стационарных условиях пробы помещали для просушивания в эксикаторы (до химического анализа). Разложение проб проводили в тефлоновых контейнерах с герметичными крышками смесью из 2 мл 65% HNO_3 и 1 мл 30% H_2O_2 при $\leq 70°C$ в течение 3 часов, взяв за основу методику (Martin, Knauer, 1973). Объем конечной пробы составлял 20 мл. Концентрацию As, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni и Pb в аналитах определяли методом масс спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре Agilent 7500 (США). Правильность анализа контролировали с помощью сертифицированных стандартных образцов планктона BCR 414.

Результаты анализа состава сообщества зоопланктона

В состав собранного зоопланктона входили крылоногие моллюски, морские стрелки, аппендикулярии, но наибольшую биомассу составляли виды копепод. Массовые виды копепод являются растительноядными представителями сообщества. Северный Полярный фронт служит границей между двумя водными массами не только по гидрофизическим параметрам, но и по составу сообщества, разделяя разные комплексы видов. На северных станциях преобладали морские стрелки – хищники, там же массово отмечались аппендикулярии, которые питаются одноклеточными водорослями и простейшими. В северной части Баренцева моря копеподы были представлены в основном *Calanus glacialis* и *Calanus hyperboreus,* в южной части моря *Calanus hyperboreus* встречается реже, вместо него появляется немногочисленный *Calanus finmarchicus.* К югу от Полярного фронта состав зоопланктонного сообщества изменяется: арктические виды исчезают, преобладают виды бореального комплекса, общая биомасса уменьшается. Состав фитопланктонных сообществ также трансформируется в зависимости от водных масс. По-видимому,

эти факторы могут влиять на концентрации металлов в собранных нами пробах. По-видимому, эти факторы могут влиять на концентрации металлов в собранных нами пробах.

Результаты анализа тяжелых металлов и мышьяка в зоопланктоне

В таблице 1 представлены результаты анализа тяжелых металлов и мышьяка в тринадцати пробах зоопланктона (преимущественно *Calanus glacialis*), отобранных в Баренцевом море.

Таблица 1. Содержание тяжелых металлов и мышьяка (мкг/г сух.в.) в зоопланктоне Баренцева моря

№ станции	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Pb
5548	0.25	0.04	0.76	5.4	25.1	4.7	0.09	0.59	0.45
5562	4.02	1.54	8.08	47.3	42.8	13.0	0.27	0.19	5.64
5563	–	0.07	0.93	1.7	65.8	5.8	0.01	2.56	5.39
5564	2.4	0.55	4.96	44.6	61.6	31.0	0.49	1.76	3.86
5565	1.19	1.23	9.06	73.2	82.3	51.3	2.5	0.88	11.71
5566	1.12	0.53	8.52	32.1	72.8	44.3	4.28	1.43	16.87
5567	1.42	0.55	5.21	40.6	73.3	46.0	0.39	1.74	3.18
5568	0.91	0.37	3.02	50.5	44.4	49.0	0.33	1.73	2.34
5569	1.07	0.36	4.4	11.5	24.2	52.3	2.83	1.29	11.73
5570	6.44	2.36	9.44	94.4	28.5	33.1	0.57	2.15	15.91
5571	0.92	0.43	4.95	40.7	67.5	52.8	0.17	0.41	1.84
5573	0.98	0.04	0.72	7.1	21.2	1.0	0.08	2.31	0.68
5576	0.31	0.17	1.62	11.1	55.8	9.7	1.01	1.19	6.64
Среднее	1.75	0.63	4.74	35.4	51.2	30.3	1.00	1.40	6.63
Средне-квадратичное отклонение	±1.73	±0.68	±3.23	±28.0	±21.3	±20.5	±1.23	±0.73	±5.62
Коэффициент вариации *V*,%	102	107	68.3	79.1	41.7	68.0	133	52.6	84.3

Наиболее высокие концентрации были определены для трех элементов – цинка, меди и мышьяка, средние концентрации этих элементов лежат в пределах 30–50 мкг/г сух.в. Примерно на порядок меньше средние концентрации свинца и никеля (от 4 до 6 мкг/г сух.в.). Остальные тяжелые металлы (хром, кадмий, кобальт и молибден) находятся в зоопланктоне в еще более низких концентрациях (<2 мкг/г сух.в.). Напомним, что Zn, Cu, Ni, Co, Cr и Mo являются эссенциальными элементами, необходимыми для нормального функционирования организмов, тогда как Pb и As относятся к разряду токсичных элементов. Ряд по возрастанию средних концен-

траций элементов выглядит следующим образом: Co < Mo < Cd < Cr < Ni < Pb < As < Cu < Zn. Этот ряд не совпадает с порядком возрастания концентраций элементов в растворенной и взвешенной фазах морской воды (Bruland, Lohan, 2004). Другими словами, повышенные концентрации демонстрируют как биохимически «полезные», так и токсичные элементы, то есть накопление элементов в зоопланктонных организмах Баренцева моря происходит в результате неселективной биоаккумуляции. Это подтверждает аналогичные выводы для биоты других районов океана, включая глубоководные гидротермальные поля (Демина, Галкин, 2008; Demina et al., 2013; Демина, 2015). Автотрофные фитопланктонные организмы, лежащие в основе диеты копепод, осуществляют биотрансформацию мышьяка и его накопление по трофической пищевой цепи, усиливая биоаккумуляцию мышьяка в организмах более высокого трофического уровня, включая животных и человека, что представляет потенциальный токсичный эффект (Rahman et al., 2012).

Вариабельность концентрации каждого из элементов в исследуемом зоопланктоне весьма высока, коэффициент вариации *V* изменяется от 52.6 (Cd) до 133 (Mo) %. Значение *V* выше 30–35 % свидетельствует о значительном разбросе значений концентраций каждого из элементов, то есть о неоднородности их распределения. Стоит отметить, что некоторые важные для седиментации биогеохимические параметры, такие как первичная продукция, концентрация водной и воздушной взвеси, также характеризуются значительной изменчивостью (Саввичев и др., 2017). Принимая это во внимание, рассмотрим основные трэнды распределения ТМ и металлоида As в зоопланктоне исследованных районов моря.

На рис. 2 представлено сопоставление средних концентраций тяжелых металлов и мышьяка в зоопланктоне трех водных масс − арктической, прибрежной и атлантической, которые различаются гидрометеорологическими условиями (Терещенко,1999), первичной продукцией (Виноградов, Шушкина, 2001; Зернова и др., 2003) и концентрацией взвеси (Politova et al., 2010; 2012).

В зоопланктоне из арктической водной массы к юго-востоку от Земли Франца-Иосифа концентрации Cr, Cu и Zn заметно повышены (на 30–40%) по срав-

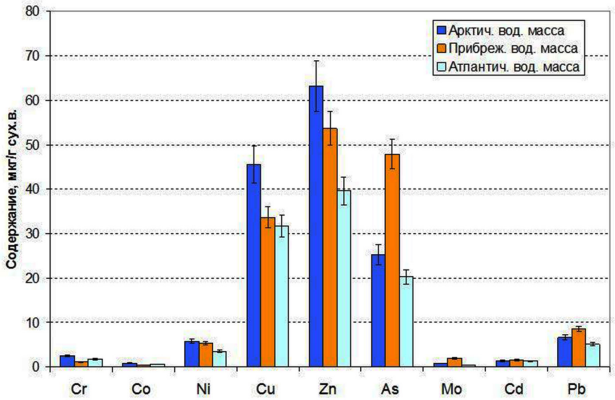

Рис. 2. Средние концентрации хрома, кобальта, никеля, меди, цинка, мышьяка, молибдена, кадмия и свинца в копеподовом зоопланктоне, отобранном в различных водных массах: арктической, прибрежной и атлантической.

нению с прибрежной и атлантической водными массами. На кромке тающего льда, в области Северного полярного фронта, отмечаются наиболее высокие концентрации взвеси, а также всплеск первичной продукции (Саввичев и др., 2017), при этом вода, как правило, обогащена биогенными и микроэлементами, необходимыми для биопродуцирования. По-видимому, этот факт способствует более интенсивной биоаккумуляции эссенциальных тяжелых металлов Cu, Zn и Cr в планктоне арктической водной массы.

В зоопланктоне из прибрежной водной массы северо-западного побережья о. Новая Земля существенно повышено лишь содержание As и Pb по сравнению с атлантическими и арктическими водными массами. Этот факт можно объяснить следующими причинами. Для побережья Новой Земли характерны сезонные стоки тающих ледников, которые сопровождаются бурным развитием фитопланктона (Зернова и др., 2003), в результате чего повышается роль биогенной составляющей взвеси. Фитопланктон обладает по сравнению с зоопланктоном повышенным метаболизмом, а также наибольшей удельной поверхностью, что приводит к высоким коэффициентам бионакопления (BCF) в нем микроэлементов, до 100 раз превышающих таковые в зоопланктоне (Sunda, 1989). В районах повышенной первичной продукции это может служить причиной высоких концентраций ряда металлов в зоопланктоне рода Calanus, для которого фитопланктон составляет основную часть диеты. С другой стороны, источником высоких концентраций металлов могут быть ледники, микроэлементный состав которых сформирован аэрозолями. Для северо-западной части России установлено обогащение аэрозолей свинцом (Шевченко, 2006).

Зоопланктон из атлантической водной массы (в районе между 74°30’–72°с.ш. и 30–45°в.д.) характеризуется наиболее низкими концентрациями большинства элементов (Ni, Cu, Zn, As и Pb). Можно предположить, что в этой открытой и наиболее южной исследованной нами части моря это связано с пониженной продукцией фитопланктона (Кузнецов, Шошина, 2002), с пониженным содержанием взвеси (Politova et al., 2010), а также с изменением видового состава зоопланктона, о чем упоминалось выше.

Таким образом, на накопление металлов в зоопланктонных организмах Баренцева моря, как и других морей, оказывают сопряженное влияние как биотические, так и абиотические процессы.

В табл. 2 представлены содержания тяжелых металлов и мышьяка в зоопланктоне разных арктических морей.

Отметим, что в работах российских авторов содержатся данные по значительно большему числу металлов, чем в зарубежных. Из табл. 2 можно видеть, что содержания Co, Ni, Mo, As и Cd находятся в пределах одного десятичного порядка величин. В планктоне Баренцева моря, так же, как и Белого моря и северных бухт Шпицбергена, обнаружены более высокие концентрации Cu, чем в планктоне открытой части Карского моря и заливе Баффина. Возможной причиной служит то, что большая часть наших данных включает мелководные районы моря с повышенной первичной продукцией, что способствует более высокой аккумуляции эссенциального тяжелого металла меди.

Таблица 2. Сопоставление средних концентраций тяжелых металлов и мышьяка (мкг/г сух.в.) в копеподовом зоопланктоне рода Calanus Баренцева моря и других морей Арктики

Море	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Pb	Ссылка
Баренцево (n = 13)*	1.75	0.63	4.74	35.4	51	30	1.0	1.40	6.63	Данная работа
Карское (n = 8)	2.43	0.19	2.4	6.3	107	21	0.3	1.25	0.31	Лобус, 2016
Белое (n = 21)	35	0.76	3.56	54	305	9.6	nd	2.26	14.6	Демина, Немировская, 2007
Баффина **)	nd	nd	1.33	1.55	17.7	nd	nd	1.62	0.25	Campbell et al., 2005
Северные бухты Шпицбергена	nd	nd	nd	38	53	nd	nd	4.7	nd	Zauke, Schmalenbach, 2006

Примечание: n – число проб, * – средние значения, ** – концентрации металлов приведены на сырое вещество, nd – нет данных

Заключение

Изучение элементного состава зоопланктона, который осуществляет передачу вещества и энергии от первичных продуцентов к организмов высокого трофического уровня и служит второй ступенью глобального биофильтра (Лисицын, 2001, 2004, 2008), представляет интерес с точки зрения вклада живого вещества в процессы седиментации. Исследование распределения концентраций ряда тяжелых металлов (Cu, Zn, Cr, Ni, Co, Mo, Pb) и As в зоопланктоне рода Calanus, собранном в июле–августе 2017 г. в северо-восточной, восточной и центральной частях Баренцева моря, позволило сделать следующие выводы.

В зоопланктоне арктической водной массы к юго-востоку от Земли Франца-Иосифа повышенное содержание эссенциальных тяжелых металлов Cu, Zn и Cr по сравнению с прибрежной и атлантической водными массами отмечено на границах водных масс (Северный полярный фронт). Зоопланктон из центральной части моря (атлантическая водная масса), где продукция фитопланктона понижена, характеризуется наиболее низкими концентрациями большинства элементов (Ni, Cu, Zn, As и Pb). Таким образом, на пространственное распределение металлов в зоопланктонных массах оказывают влияние биотические факторы экосистемы, связанные с биопродуктивностью, а также гидрологические и геохимические параметры среды обитания.

Наиболее высокие концентрации установлены как для эссенциальных тяжелых металлов (Zn и Cu), так и для токсичного металлоида As, что может свидетельствовать о неселективной биоаккумуляции микроэлементов копеподами, обусловленной, в том числе, и биотрансформацией мышьяка при переносе его по трофической цепочке от фитопланктона.

Сравнение наших и литературных данных по другим арктическим районам показало, что содержания Co, Ni, Mo, As и Cd находятся в пределах одного десятичного порядка величин. Исключением служит Cu, среднее содержание которой в

зоопланктоне Баренцева моря оказалось более высоким, по-видимому, вследствие того, что большинство проб было отобрано из районов с повышенной первичной продукцией, что способствует более высокой аккумуляции этого эссенциального тяжелого металла.

Работа выполнена в рамках Государственного задания, тема № 0149-2019-0007 (руководитель академик А.П. Лисицын). Сбор материала в экспедиции проведен при финансовой поддержке гранта РНФ № 14-50-00095 по направлению «Взаимодействие геосфер и минеральные ресурсы Мирового океана» (руководитель академик А.П. Лисицын), анализ и интерпретация данных выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ № 19-17-00234 (рук. И.А. Немировская)

Литература

Богоров В.Г. Планктон Мирового океана. М.: Наука, 1974. 320 с.

Виноградов М.Е., Шушкина Э.А. Экосистемы арктической пелагиали // В кн.: Опыт системных исследований в Арктике. М.: Научный мир, 2001. С. 282–288.

Гуревич В.И. Современный седиментогенез и геоэкология Западно-Арктического шельфа Евразии. М.: Научный мир, 2002. 135 с.

Дворецкий В.Г., Дворецкий А.Г. Распределение зоопланктона Баренцева моря в августе 2006 г. // Океанология. 2010. № 6. С. 964–972.

Демина Л.Л. Количественная оценка роли живого вещества в геохимической миграции микроэлементов в океане // Геохимия. 2015. № 3. С. 234–251.

Демина Л.Л., Галкин С.В. Биоаккумуляция тяжелых металлов в донных биоценозах окислительных и восстановительных обстановок океана: сходство и различие // Геохимия. 2018. № 6. С. 572–585.

Зенкевич Л.А. Биология морей СССР. М.: Изд-во АН СССР. 1963. 739 с.

Зернова В.В., Политова Н.В., Шевченко В.П. Особенности структуры фитоцена Баренцева моря на меридиональном разрезе по 37–40° с.ш. (сентябрь 1997 г.) // Океанология. 2003. Т. 43. № 3. С. 419–427.

Кузнецов Л.Л., Шошина Е.В. Фитоценозы Баренцева моря (физиологические и структурные характеристики). Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2002. 308 с.

Лисицын А.П. Потоки вещества и энергии во внешних и внутренних сферах Земли (Отв. ред. акад. РАН Н.А. Добрецов, В.И. Коваленко) // Глобальные изменения природной среды – 2001. Новосибирск: ГЕО РАН, 2001. С. 163–249.

Лисицын А.П. Потоки осадочного вещества. природные фильтры и осадочные системы «живого океана» // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 1. С. 15–48.

Лисицын А.П. Маргинальные фильтры и биофильтры Мирового океана. // Океанология на старте XXI века. М.: Наука, 2008. С. 159–224.

Лисицын А.П. Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер Земли // Мировой океан. Т. II. Физика, химия и биология океана. Осадкообразование в океане и взаимодействие геосфер Земли // Под общ. ред. чл.-корр. РАН Л.И. Лобковского и академика Р.И. Нигматулина. М.: Научный мир, 2014. С. 331–571.

Лобус Н.В. Элементный состав зоопланктона Карского моря и заливов восточного побережья Новой Земли // Океанология. 2016. Т. 56. № 6. С. 890–900.

Макаревич П.Р. Первичная продукция Баренцева моря // Вестник МГУ. 2012. Т. 15. № 4. С. 786–793.

Матишов Г.Г., Павлова Л.Г., Ильин Г.Г. Гидрохимические и геохимические процессы в экосистеме Баренцева моря // Химические процессы в экосистемах северных морей (гидрохимия, геохимия, нефтяное загрязнение). Апатиты. Изд-во КНЦ РАН, 1997. С. 5–185.

Новиков М.А., Жилин А.Ю. Характер распределения тяжелых металлов в донных отложениях Баренцева моря (по результатам статистического анализа). Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. 29. С. 78–88.

Романкевич Е.А. Живое вещество Земли: биохимические аспекты проблемы // Геохимия. 1988. № 2. С. 292–306.

Саввичев А.С., Паутова Л.А., Абызова Г.А., Калмацкая О.А., Кравчишина М.Д. Отчет отряда микробиологии и планктона // Отчет о работах 68-го рейса НИС Академик Мстислав Келдыш в Северной Атлантике, в Норвежском и Баренцевом морях. 29.06.–18.08.2017. Т. 1. С. 301–357.

Саенко Г.Н. Закономерности концентрирования металлов и галогенов морскими организмами // Докл. АН СССР. 1989. Т. 306. № 3. С.759–763.

Терещенко В.В. Гидрометеорологические условия в Баренцевом море в 1985–1998 гг. Мурманск: ПИНРО, 1999. 176 с.

Шевченко В.П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 230 с.

AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme) (2007) Chapter 4 Sources, Inputs and Concentrations of Petroleum Hydrocarbons, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and other Contaminants Related to Oil and Gas Activities in the Arctic. Oslo: AMAP, 2000. 87 pp.

Bruland K.W. Trace elements in sea-water. In: Chemical Oceanography (eds. Riley J.P. Chester R.) Acad. Press. London. 1983. P. 157–220.

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. Vol. 2(1). P. 1–41.

Demina L.L., Holm N.G., Galkin S.V., Lein A.Yu. Some features of the trace metal biogeochemistry in the deep-sea hydrothermal vent fields (Menez Gwen, Rainbow, Broken Spur at the MAR and 9º50'N at the EPR): A synthesis // Journal of Marine Systems. 2013. Vol. 126. P. 94–105.

Fisher K., Wente M. The release of trace elements by dying phytoplankton // Deep-Sea Res. I. 1993. Vol. 40. P. 671–694.

Fowler S.W., Knauer G.A. Role of large particles in the transport of elements and organic compounds through the oceanic water column // Prog. Oceanog. 1986. Vol. 16. No. 3. P. 147–194.

*Lisitzin A.*P. Sea-Ice and Iceberg Sedimentation in the Ocean. Recent and Past. Berlin: Springer, 2002. 563 p.

Martin J.-H., Knauer G.A. The elemental composition of plankton // Geochim. Cosmochim. Acta. 1973. Vol. 37. No. 7. P. 1639–1653.

Mauchline J. The biology of Calanoid Copepods. London. Academic Press Ltd., 1998. 710 p.

Mohan M., Sreelakshmi U., Vishnu Sagar, Gopikrishna V.G., Pandit G.G., Sahu S.K., Tiwari M., Ajmal P.Y., Kannan V.M., Abdul Shukur M., Krishnan K.P. Metal Contamination Profile and Sediment Accumulation Rate of Arctic Fjords: Implications from a Sediment Core. Kongsfjorden. Svalbard. 42. Marine Pollution Bulletin. 2018. P. 131 (453–459).

Politova N.V., Shevchenko V.P., Kravchishina M.D. Suspended particulate matter in the Russian Arctic seas // Seabed morphology of Arctic Russian shelf. New York: Nova Science Publishers. Inc., 2010. P. 73–85.

Politova N.V., Shevchenko V.P., Zernova V.V. Distribution. composition. and vertical fluxes of particulate matter in bays of Novaya Zemlya Archipelago. Vaigach Island at the end of summer // Advances in Meteorology. 2012. Article ID 259316. 15 p. DOI:10.1155/2012/259316.

Rahman A.M., Hasegawa H., Peter Lim R. Bioaccumulation, biotransformation and trophic transfer of arsenic in the aquatic food chain // Environ. Res. 2012. Vol. 116. P. 118–135.

Simkiss K., Taylor M.G. Metal fluxes across the membranes of aquatic organisms // Rev. Aquat. Sci. 1989. Vol. 1. P. 173–188.

Sunda W.G. Trace metal interactions with marine phytoplankton // Biol. Oceanogr. 1989. No. 6. P. 411–442.

Wassmann P., Reigstad M., Haug T., Rudels, B., Carroll M. L., Hop, H., Slagstad D. Food webs and carbon flux in the Barents Sea // Progress in Oceanography. 2006. Vol. 71. No. 2–4. P. 232–287.

Williams P.J.L. Incorporation of microheterotrophic processes into the classical paradigm of the planktonic food web // Kieler Meeresforsch. Sonderh. 1981. Vol. 5. P. 1–27.

Zauke G.P., Schmalenbach I. Heavy metals in zooplankton and decapod crustaceans from the Barents Sea // Science of the Total Environment. 2005. Vol. 359. No. 1. P. 283–294. DOI:10.1016/j.scitotenv.2005.09.002.

HEAVY METALS IN ZOOPLANKTON ORGANISMS OF THE BARENTS SEA

Demina L.L., Solomatina A. S., Abyzova G.A.

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36 Nahimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia, e–mail: l_demina@mail.ru
Submitted 15.08.2019, accepted 21.11.2019

Zooplankton plays a Central role in the transfer of matter and energy from primary producers to high trophic organisms, and zooplankton serves as an essential component of sedimentary material that supplies organic matter to the bottom of marine basins. The paper presents new data on the distribution of a number of heavy metals (Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb) and As in the Calanus zooplankton collected in July–August 2017 in the North-Eastern, Eastern and Central parts of the Barents Sea. It is shown that the spatial distribution of metals in zooplankton organisms is influenced by both biotic ecosystem factors associated with bioproductivity and hydrological and geochemical parameters of the habitat (North Polar Front). In the zooplankton of the Arctic water mass to the South-East of Franz Josef Land, there was an increased content of essential heavy metals Cu, Zn and Cr in comparison with the coastal and Atlantic water masses. Zooplankton from the Central part of the sea (Atlantic water mass), where phytoplankton production is reduced, is characterized by the lowest concentrations of most elements (Ni, Cu, Zn, As and Pb). The highest concentrations were found for both essential heavy metals (Zn and Cu) and toxic metalloid As, which may indicate non-selective bioaccumulation of trace elements by copepods.

Keywords: heavy metals, As, zooplankton, copepods, bioaccumulation, Barents Sae

References

AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme). Chapter 4. Sources, Inputs and Concentrations of Petroleum Hydrocarbons, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and other

Contaminants Related to Oil and Gas Activities in the Arctic. Oslo: AMAP, 2007, 87 p.

Bogorov V.G. Plankton Mirovogo okeana (Plankton of the World Ocean). Moscow: Nauka, 1974, 320 p.

Bruland K.W. Trace elements in sea-water. In: Chemical Oceanography (eds. Riley J.P., Chester R.) London: Acad. Press, 1983, pp. 157–220.

Conover R.J. and 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, Vol. 2, pp. 1–41.

Demina L.L. Kolichestvennaya otzenka roli zhivogo vecshestva v geochimicheskoy migratzii mikrolementov v okeane (Estimation of the living matter's role in the trace metal geochemical migration in the ocean). *Geokhimiya*, 2015, No. 3, pp. 234–251.

Demina L.L., Holm N.G., Galkin S.V., and Lein A.Yu. Some features of the trace metal biogeochemistry in the deep-sea hydrothermal vent fields (Menez Gwen. Rainbow. Broken Spur at the MAR and 9º50'N at the EPR): a synthesis. *Journal of Marine Systems,* 2013, Vol. 126, pp. 94–105.

Demina L.L. and Galkin S.V. O roli abiogennykh factortov v bioakkumulyatzii tayzhelykh metallov v gidrotermalnoi faune Sredinno-Atlanticheskogo Khrebta (About role of abiogenic factors in the heavy metal bioaccumulation of the Mid-Atlantic Ridge). *Okeanologiya*, 2008, Vol. 48, No. 6, pp. 847–860.

Dvoretzkii V.G. and Dvoretzkii A.G. Raspredelenie zooplanktona v Baretzevom more v avguste 2006 (Zooplankton distribution in the Barentz Sea in August, 2006). *Okeanologiya*, 2010, No. 6, pp. 964–972.

Fisher K. and Wente M. The release of trace elements by dying phytoplankton. *Deep-Sea Res. I.,* 1993, Vol. 40, pp. 671–694.

Fowler S.W. and Knauer G.A. Role of large particles in the transport of elements and organic compounds through the oceanic water column. *Prog. Oceanog.,* 1986, Vol. 16, No. 3, pp. 147–194.

Gurevich V.I. Sovremennyi sedimentogenez i geoekologyya Zapadno-Arkticheskogo shelfa Evrazii (Modern sedimentation and geoecology of west Arctic Euroasian shelf). Moscow: Nauchnyi Mir, 2002, 135 p.

Kuznetsov L.L. and Shoshina E.V. Phitocenozy Barentseva morya (phisiologicheskie i structurnye characteristiki). (Phytocenes of the Barents Sea (physiological and structural characteristics). Apatity: Izd-vo KNTZ RAN, 2002, 308 p.

Lisitzin A.P. Marginalnye filtry i biofiltry Mirovogo okeana (Marginal filters and biofilters of the World Ocean). Oкeanologiay na starte XXI veka. Moscow: Nauka, 2008, pp. 159–224.

Lisitzin A.P. Potoki osadochnogo vecshestva, prirodnye filtry i osadochnye systemy "zhivogo okeana". (Sediment fluxes, natural filtering, and sedimentary systems of a "living ocean"). *Russian geology and geophysics*, 2004, Vol. 45, No. 1, pp. 15–48.

Lisitzin A.P. Potoki veshchestva i energii vo vneshnikh i vnutrennikh sferakh Zemli (Fluxes of the matter and the energy in the external and internal Earth' spheres). In: *Global'nye izmeneniya prirodnoi sredy* (Global changes of the natural environment), Novosibirsk: GEO, 2001, pp. 163–249.

Lisitzin A.P. Sea-Ice and Iceberg Sedimentation in the Ocean. Recent and Past. Springer. Berlin: 2002, 563 pp.

Lisitzin A.P. Sovremennye predstavleniya ob osadkoobrazovanii v okeanakh i moryakh. Okean kak prirodnyi samopisets vzaimodeistviya geosfer Zemli (Modern conceptions on sediment formation in oceans and seas. Ocean as a natural recorder of geospheres' interaction). In: Mirovoi ocean, (World Ocean), Moscow: Nauchnyi mir, 2014, Vol. 2, pp. 331–553.

Lobus N.V. Elementnyi sostav zooplanktona Karskogo morya i zalivov vostochnogo pobereziya Novoi Zemli (Elemental composition of the Kara Sea zooplankton and the eastern coast bays of the Novaya Zemlya). *Okeanologiya*, 2016, Vol. 56, No. 6, pp. 890–900.

Matishov G.G., Pavlova L.G., and Il'in G.G. Gidrochomicheskie i geochimicheskie processy v ecosisteme Barentzeva morya (Hydrochemical and geochemical processes in the Barents Sea ecosystem). Chimicheskie processy v ecosystermakh severnukh morey (gidrohimiya, geochimiya, neftyanoe zagryaznenie). Apatity: Izd-vo KNTZ RAN, 1997, pp. 5–185.

Makarevich P.R. Pervichnaya produktziya Barentseva moray (The Primary production of the Barents Sea). *Vestnik MGU*, 2012, Vol. 15, No. 4, pp. 786–793.

Martin J.-H. and Knauer G.A. The elemental composition of plankton. Geochim. Cosmochim. Acta, 1973, Vol. 37, No. 7, pp. 1639–1653.

Mauchline J. The biology of Calanoid Copepods. London: Academic Press Ltd., 1998, 710 p.

Mohan M., Sreelakshmi U., Vishnu Sagar, Gopikrishna V.G., Pandit G.G., Sahu S.K., Tiwari M., Ajmal P.Y., Kannan V.M., Abdul Shukur M., and Krishnan K.P. Metal Contamination Profile and Sediment Accumulation Rate of Arctic Fjords: Implications from a Sediment Core. Kongsfjorden. Svalbard. 42. *Marine Pollution Bulletin*. 2018, pp. 131(453–459).

Novikov M. and Zhilin A.Yu. Kharacter rasprtedeleniya tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh Barentzeva morya (po resultatam statisticheskogo analiza) (Distribution pattern of heavy metals in the Barents Sea bottom sediments (based on statistical analysis)). *Vestnik KRAUNTZ*, 2016, No. 1, Vol. 29, pp. 78–88.

Politova N.V., Shevchenko V.P., and Kravchishina M.D. Suspended particulate matter in the Russian Arctic seas. Seabed morphology of Arctic Russian shelf. New York: Nova Science Publishers. Inc., 2010, pp. 73–85.

Politova N.V., Shevchenko V.P., and Zernova V.V. Distribution. composition. and vertical fluxes of particulate matter in bays of Novaya Zemlya Archipelago. Vaigach Island at the end of summer. *Advances in Meteorology*, 2012, Vol. 2012, 15 p., Article ID 259316, doi:10.1155/2012/259316.

Rahman A.M., Hasegawa H., and Peter Lim R. Bioaccumulation, biotransformation and trophic transfer of arsenic in the aquatic food chain. *Environ. Res.,* 2012, Vol. 116, pp. 118–135.

Romankevich E.A. Zhivoe vecshestvo Zemli: biochimicheskie aspecty problemy (The living matter of the Earth: biochemical aspects of problem). *Geochemistry*, 1988, No. 2, pp. 292–306.

Savvichev A.S., Pautova L.A., Abyzova G.A., Kalmatskaya O.A., and Kravchishina M.D. Otchet otrayda microbiologii i planktona. Otchet o rabotakh 68 reisa NIS "Akademik Mstislav Keldysh" (Report of the microbiology and plankton group. *Report on operation of cruise 68 R/V "Akademik Mstislav Keldysh" in the North Atlantic*. Vol. 1, pp. 301–357.

Schevchenko V.P. Vliyanie aerosolei na sredu i morskoe osadkonakoplenie v Arctike (Aerosols' influence on the Arctic environment and marine sedimentation). Moscow: Nauka, 2006, 230 p.

Simkiss K. and Taylor M.G. Metal fluxes across the membranes of aquatic organisms. *Rev. Aquat. Sci*., 1989, Vol. 1, pp. 173–188.

Sunda W.G. Trace metal interactions with marine phytoplankton. *Biol. Oceanogr*., 1989, No. 6, pp. 411–442.

Terecshenko V.V. Gidrometeorologicheskie uslovia v Barantsevom more v 1985–1998 gg. (Hydrometeorological condotions in the Barents Sei in 1985-1998). Murmansk: PINRO, 176 p.

Vinogradov M.E. and Shushkina E.A. Ekosistemy arkticheskoy pelagiali (Pelagic Ecosystems

of the Arctic Ocean). In: Opyt sistemnykh okeanologicheskikh issledovanii v Arktike (Experience of system oceanologic studies in the Arctic), Moscow: Nauchnyi Mir, 2001, pp. 282–288.

Wassmann P., Reigstad M., Haug T., Rudels B., Carroll M. L., Hop H., and Slagstad D. Food webs and carbon flux in the Barents Sea. *Progress in Oceanography*, 2006, Vol. 71, No. 2–4, pp. 232–287.

Williams P.J.L. Incorporation of microheterotrophic processes into the classical paradigm of the planktonic food web. *Kieler Meeresforsch. Sonderh*., 1981, Vol. 5, pp. 1–27.

Zauke G.P. and Schmalenbach I. Heavy metals in zooplankton and decapod crustaceans from the Barents Sea. *Science of the Total Environment*. 2005, Vol. 359, No. 1, pp. 283–294, doi:10.1016/j.scitotenv.2005.09.002.

Zenkevitch L.A. Biologiya morey SSSR (Biology of the USSR Seas). Moscow: Nauka, 1963, 739 p.

Zernova V.V., Politova N.V., and Shevchenko V.P. Osobennosti structury phytocena Barentseva morya na meridionalnom razreze po 37–40°N (Sentyabr 2007) (The phytocene structure's features along the 37-40°N meridional transect in the Barents Sea, September 2007). *Okeanologiya*, 2003, Vol. 43, No. 3, pp. 419–427.