

УДК 574.632:594(26.05)

Е.В. Лысенко¹, Е.Н. Чернова^{1,2*}

¹ Тихоокеанский институт географии ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7;

² Дальневосточный федеральный университет,
690922, г. Владивосток, о. Русский, пос. Аякс, 10

ПЕРЕНОС ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ПО ТРОФИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЛАНКТОН — МОЛЛЮСКИ-ФИЛЬТРАТОРЫ В СОЛОНОВАТОВОДНЫХ ЛАГУННЫХ ОЗЕРАХ ПОБЕРЕЖЬЯ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Определено содержание металлов Fe, Mn, Ni, Pb, Zn, Cd, Cu в воде, взвеси, планктоне и двустворчатых моллюсках из солоноватоводных лагунных озер побережья Японского моря (Приморский край). В трофической цепи фитопланктон–моллюски наблюдается тенденция снижения содержания Fe, Mn, Ni, Pb, что связано с преобладанием металлов в воде во взвешенной форме и уменьшением удельной площади поверхности с увеличением трофического уровня организмов. Сопоставимые концентрации Cu, Zn и Cd в фитопланктоне и моллюсках связаны с преобладанием элементов в воде в растворенной форме, низким содержанием взвешенного органического вещества, благодаря чему моллюски сохраняют высокую скорость фильтрации.

Ключевые слова: Японское море, восточный Сихотэ-Алинь, солоноватоводные лагунные озера, тяжелые металлы, трофическая цепь, двустворчатые моллюски, планктон, взвешенное вещество.

Lysenko E.V., Chernova E.N. Transfer of trace metals by trophic chain of plankton — filter-feeding bivalves in the brackish-water lagoon lakes on the Japan Sea coast // *Izv. TINRO*. — 2016. — Vol. 187. — P. 197–204.

Content of the metals Fe, Mn, Ni, Pb, Zn, Cd, and Cu was determined in the water, suspended matter, plankton organisms and bivalves collected in the brackish-water lagoon lakes on the coast of the Japan Sea in July 2011–2012, August 2013, and July 2014. The lakes are located in the sparsely populated area of eastern Sikhote-Alin including the Sikhote-Alin biosphere nature reserve. The content of Fe, Mn, Ni, and Pb has a tendency to decrease along the trophic chain that is conditioned by prevalence of their suspended forms over dissolved ones in the water and decreasing of the surface : weight ratio with size of living organisms. On the contrary, the content of Cu, Zn and Cd is rather stable along the food chain because of prevalence of their dissolved forms and low content in the suspended organic matter.

Key words: Japan Sea, eastern Sikhote-Alin, brackish lagoon lake, heavy metal, trophic chain, bivalve mollusk, plankton, suspended matter.

* Лысенко Евгения Валерьевна, младший научный сотрудник, e-mail: lysenko_tig@mail.ru; Чернова Елена Николаевна, кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник, e-mail: elena@tig.dvo.ru.

Lysenko Eugenia V., junior researcher, e-mail: lysenko_tig@mail.ru; Chernova Elena N., Ph.D., senior researcher, e-mail: elena@tig.dvo.ru.

Введение

Живые организмы, обитающие в водной среде, приобретают черты, специфичные для данного водного объекта, в частности микроэлементный состав. Так как организмы накапливают металлы из воды и пищи с коэффициентами аккумуляции 10^3 – 10^6 (DeForest et al., 2007), они используются в качестве биоиндикаторов водной среды. Изучение микроэлементного состава организмов способствует пониманию процесса накопления биологически доступных металлов по трофическим цепям и накопления их в вышестоящих трофических уровнях.

Известно, что по трофической цепи накапливается ртуть (Dietz et al., 2000; Campbell et al., 2005; Dehn et al., 2006; Cui et al., 2011). Что касается остальных микроэлементов и тяжелых металлов, они, как правило, по трофической цепи не накапливаются, однако иногда процессы биомагнификации наблюдаются и для таких химических элементов, как Pb, Zn, Cd (Cui et al., 2011; Rubio-Franchini, Rico-Martínez, 2011; Monferrán et al., 2016).

Вдоль малонаселенного открытого япономорского побережья Приморского края на участках с аккумулятивным типом берегов сосредоточены мелкие солоноватоводные озера лагунного происхождения (рис. 1). Они отделены от моря песчаными или гравийно-песчаными косами. Оз. Благодати находится в пределах территории Сихотэ-Алинского государственного природного биосферного заповедника, озера Духовское, Мраморное, Круглое используются для отдыха. В то же время озера находятся на территории восточной части хребта Сихотэ-Алинь с выраженными оловосульфидно-полиметаллическими рудопроявлениями, которые оказывают влияние на химический состав водоемов и водотоков данного района (Чудаева, 2002; Чернова и др., 2014).

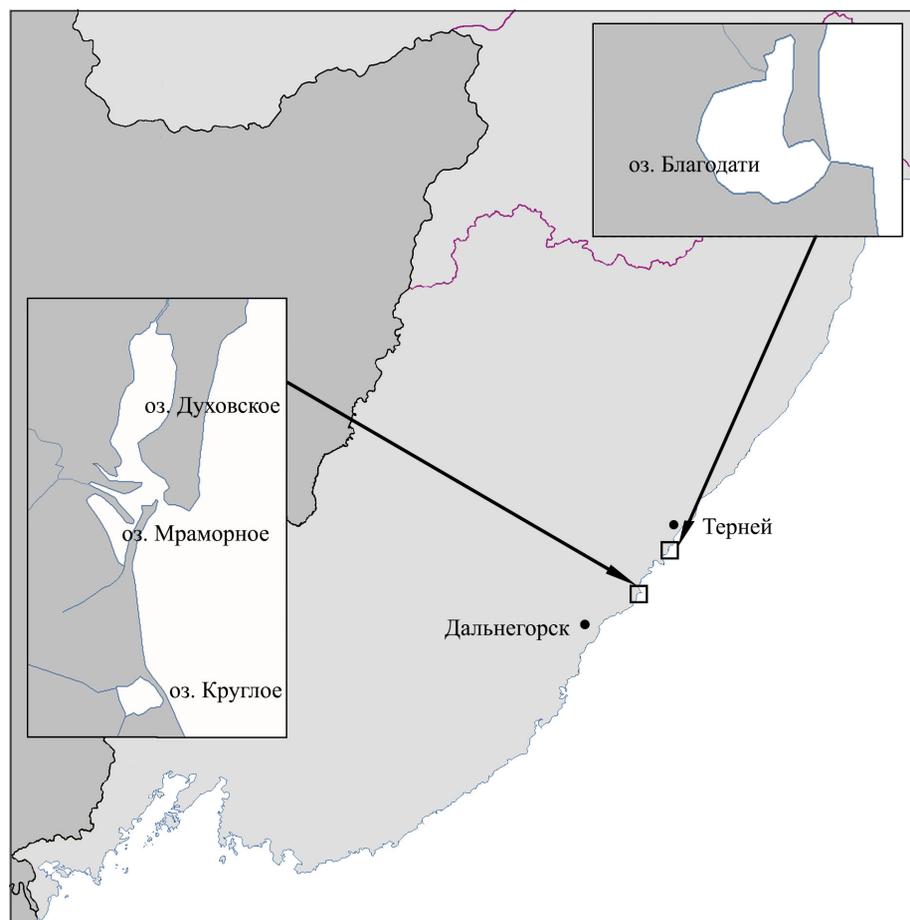


Рис. 1. Лагунные озера побережья Японского моря (восточный Сихотэ-Алинь)
Fig. 1. Lagoon lakes of the Japan Sea coast (eastern Sikhote-Alin)

Цель данной работы — представить результаты исследования концентрации микроэлементов в организмах трофической цепи планктон — двустворчатые моллюски-фильтраторы (*Corbicula japonica*) в солоноватоводных озерах побережья Японского моря (Духовском, Круглом, Мраморном и Благодати) с учетом особенностей среды их обитания.

Материалы и методы

Отбор проб воды, планктона, бентоса (двустворчатых моллюсков сем. Corbiculidae, *Corbicula japonica*) произведен во второй половине июля 2011–2012, 2014 гг. и первой половине августа 2013 г. Аномально высокое количество атмосферных осадков в июле 2013 г., сопровождающееся выходом водных объектов из берегов и размывом дорог, ведущих к озерам, явилось причиной переноса отбора проб на август.

Суммарный микрофито- и зоопланктон отбирали из поверхностного слоя воды озер (0–1 м) с весельной лодки в течение 5 мин планктонной капроновой сетью Апштейна с ячейей 0,1 мм (сито № 64), отфильтровывали с помощью ручного вакуумного насоса SM 16673 через полимерный мембранный фильтр (Durgore) 0,45 мкм. Высушивали до постоянного веса, взвешивали для определения массы планктона (2–98 мг/пробу). Зеленоватый цвет фильтров свидетельствовал о преобладании в пробе фитопланктона.

Моллюсков *C. japonica* отбирали с глубины 1,5–2,0 м. С одного места сбора отбирали 15–25 экз. с длиной раковины 3–4 мм и объединяли в 3–5 проб по 5 шт. Моллюсков отмывали, очищали от обрастаний, выдерживали 48 ч в чистой воде с места сбора, мягкие ткани отделяли от раковины, высушивали при температуре 85 °С и гомогенизировали.

Ткани моллюсков озоляли концентрированной HNO_3 марки осч в микроволновой печи MARS 5. Фильтры с планктоном и взвесью озоляли в муфельной печи при температуре 450 °С и разлагали смесью $\text{HF} + \text{HClO}_4$. Содержание металлов определяли атомно-абсорбционным методом на приборе Shimadzu 6800 в лаборатории геохимии ТИГ ДВО РАН в пламенном и беспламенном вариантах для Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Cd и Pb.

Правильность определения концентраций металлов в образцах контролировалась холостыми опытами и регулярным анализом стандартных образцов донных осадков BCSS-1, устриц NBS Oyster 1566a. При определении концентрации Pb и Cd в планктоне, Pb в моллюсках методом беспламенной атомизации проводили дополнительный контроль методом стандартных добавок, воспроизводимость которых была не ниже 80–85 %.

В анализе использовали средние значения концентраций тяжелых металлов, полученные за 2–4 года. Проверку достоверности различий между концентрациями металлов в компонентах озер проводили с помощью критерия Вилкоксона в программе Statistica 6.0.

Результаты и их обсуждение

Концентрация микроэлементов в организме на каком-либо трофическом уровне представляет собой результат комбинации биоконцентрирования — накопления металла организмом из водной среды (биоконцентрационный фактор устанавливается в контролируемых условиях эксперимента) — и биоаккумуляции — накопления организмом металла из всех источников, в том числе и из воды (биоаккумуляционный фактор устанавливается в природных условиях) (Chen et al., 2000; DeForest et al., 2007). Отношение содержания микроэлемента в организме и в его пище называется трофическим фактором (DeForest et al., 2007). Чтобы понять причины возрастания или снижения концентраций металлов по водной трофической цепи, необходимо изучить влияние многих факторов на результат концентрирования. Наиболее важны, на наш взгляд, размеры (удельная площадь поверхности) объектов пищевой цепи, особенности экологии и химического состава организмов, особенности гидрохимического состава вод, количество биодоступных форм микроэлементов, а также количество пищи.

Воды исследованных солоноватоводных лагунных озер побережья Японского моря относятся к гидрокарбонатно- и хлоридно-натриевому классу с минерализацией, изменяющейся в разные годы в достаточно широком диапазоне — 0,06–18,0 г/л. Водно-

родный показатель изменяется от слабощелочного до слабокислого — 5,95–8,38, содержание взвешенного вещества — от 1,45 до 8,41 мг/л (максимальное — 16,0–18,5 мг/л в оз. Благодати во время низкой водности 2014 г.). Содержание растворенного органического углерода ($C_{орг}$) — 1,9–8,0 мг/л, что составляет 61–93 % общего $C_{орг}$. Содержание взвешенного $C_{орг}$ в 2–13 раз ниже растворенного — 0,26–3,65 мг/л, доля органического углерода в составе взвешенного вещества — 10,3–12,5 % (25,5 % — оз. Благодати) (Луценко и др., 2014; Чернова и др., 2014). Высокое содержание $C_{орг}$ в составе взвешенного вещества (ВВ) (25,5 %) связано с высоким вкладом в водосбор озера болотных вод (Луценко и др., 2014), содержащих коллоидные соединения гуминовых кислот с 50–52 % углерода.

Содержание микроэлементов в воде лагунных озер в растворенной и взвешенной форме невелико, не превышает нормативов для рыбохозяйственных водоемов и сопоставимо с концентрациями микроэлементов в поверхностных водотоках этого района (Шулькин и др., 2009; Чернова и др., 2014). Во взвеси озер концентрации микроэлементов сопоставимы с таковыми во взвеси рек ВСА (Чудаева, 2002; Чернова и др., 2014).

Взвешенное вещество из солонатовых озер содержит сопоставимые с кларками (К) микроэлементов в осадочных породах (Войткевич и др., 1977) концентрации Fe (К = 3330,0 мкг/г), Zn (К = 80,0 мкг/г), обогащено марганцем в 1,0–3,0 раза (К = 670,0 мкг/г), свинцом в 1,5–3,0 раза (К = 20,0 мкг/г), кадмием — в 26,0–37,0, в оз. Духовском — в 77,0 раза (К = 0,03 мкг/г). Содержание никеля и меди во ВВ озер в 1,5–2,0 и 3,0–5,0 раза меньше, чем их кларки в осадочных породах — соответственно 95 и 57 мкг/г (рис. 2, 3). Это подтверждает вывод о повышенном фоновом уровне содержания Pb и Cd в горных породах водосборного бассейна озер в связи с их принадлежностью к участку хребта восточной части Сихотэ-Алиня с повышенной минерализацией (Чудаева, 2002).

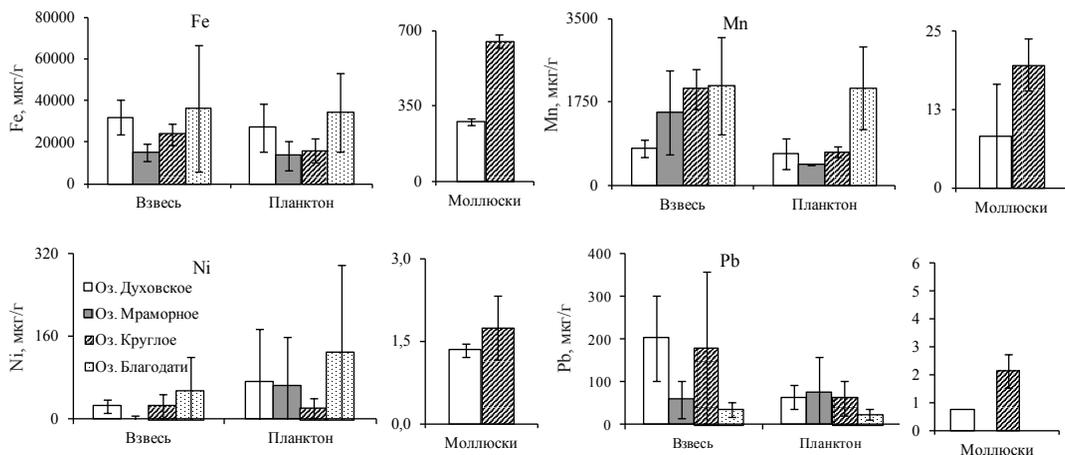


Рис. 2. Содержание Fe, Mn, Ni и Pb (мкг/г сух. массы) в компонентах трофической цепи планктон–моллюски из солонатоводных лагунных озер побережья Японского моря, 2011–2014 гг.

Fig. 2. Content of Fe, Mn, Ni, and Pb in components of the trophic chain plankton-bivalves in brackish lagoon lakes on the Japan Sea coast in 2011–2014, µg/g DW

Одним из важных путей поступления металлов в водные организмы является контакт воды с поверхностью тела. Чем больше площадь поверхности тела, тем выше способность поглощать (усваивать) элементы. В трофической цепи, как правило, поедаемые объекты меньше по размерам, чем их потребители. Именно влиянием увеличения размера и, соответственно, снижением удельной поверхности тела часто объясняется снижение концентраций металлов в организмах по трофической цепи (Сиротский и др., 2011; Tao et al., 2012a).

Для изучения влияния размера организмов на накопление металлов рассмотрим концентрацию элементов в разных по происхождению и сопоставимых по размеру частицах — ВВ и планктоне. Взвешенное вещество солонатоводных озер представляет собой смесь из минеральной взвеси, органического детрита, а также микроорганизмов, фитопланктона и простейших с содержанием органического углерода 10–25 %

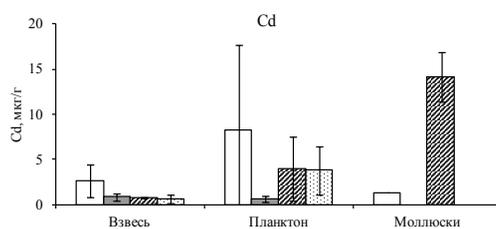
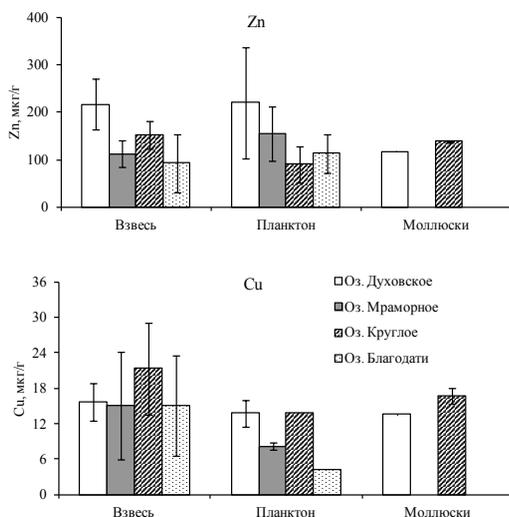


Рис. 3. Содержание Zn, Cd и Cu (мкг/г сух. массы) в элементах трофической цепи планктон–моллюски из солоноватоводных лагунных озер побережья Японского моря, 2011–2014 гг.

Fig. 3. Content of Zn, Cd and Cu in components of the trophic chain plankton-bivalves in brackish lagoon lakes on the Japan Sea coast in 2011–2014, µg/g DW

(Луценко и др., 2014). Проба планктона представляет собой смесь живых организмов и частиц детрита размером от 100 мкм до 1–2 мм, собранных сетью Джеди в толще воды. Данным способом из пробы были исключены не только минеральные частицы пелитового размера, но и микроорганизмы, а также мелкие микроводоросли размером до 100 мкм. Среднее содержание углерода в океанском и морском планктоне составляет 34,5–40,0 % (Савенко, 1988; Li, 1991; Батулин, 1993 — цит. по: Леонова, Бобров, 2012).

Концентрации Mn, Pb и Cu во взвеси были сопоставимы или выше, чем в планктоне, Fe и Zn — сопоставимы, Ni и Cd — ниже, чем в планктоне, особенно Cd (в 2,2–5,4 раза) (рис. 2, 3). В то же время различия между содержанием металлов во взвеси и планктоне недостоверны (см. таблицу). Таким образом, одноразмерные, но разные по происхождению и содержанию органического вещества компоненты экосистемы озер — планктон и ВВ — имеют сопоставимые концентрации металлов. При исследовании химического состава пресных озер восточного Сихотэ-Алиня были получены аналогичные результаты (Чернова, Лысенко, в печати).

Уровень значимости (p) критерия Вилкоксона при сравнении концентраций металлов в двух зависимых выборках (взвешенное вещество — планктон и планктон–моллюски) из солоноватоводных озер побережья Японского моря. Различия достоверны при $p < 0,05$ Significance (p) of Wilcoxon test for comparing of the metals concentration in 2 dependent samples (suspended matter — plankton and plankton-bivalves) from brackish-water lakes on the Japan Sea coast.

The differences are significant at $p < 0.05$

Выборка	Fe	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni
ВВ–планктон	0,11	0,21	0,98	0,58	0,17	0,480	0,78
Планктон–моллюски	0,11	0,11	0,90	0,50	0,34	0,043	0,11

Данные результаты не противоречат гипотезе о влиянии размера на накопление металлов по трофической цепи. Однако в зал. Гуанабарра, загрязненном металлами и органическим веществом (Kehrig et al., 2009), концентрации Cd, Pb, Cu в сестоне — материале с фильтра с диаметром пор 1,2 мкм — в 8,0–200,0, 1,6–56,0 и 4,5–12,0 раза выше, чем в фитопланктоне (1,2–70,0 мкм). Вероятно, кроме размера на интенсивность накопления металлов оказывает влияние происхождение частиц — живые клетки фитопланктона в среде с избытком тяжелых металлов способны к регуляции их поступления через клеточную мембрану. Данное свойство водорослей было отмечено в экспериментах на водорослях (Бурдин и др., 1990; Айздайчер, Гостюхина, 2015).

В трофической цепи планктон–моллюски из лагунных солоноватоводных озер снижение концентраций элементов наблюдается для Pb (23–66 раз), Mn (35–80 раз), Ni (12–70 раз), Fe (3–10 раз), хотя статистически достоверно только уменьшение концентрации Pb (см. таблицу, рис. 2). Концентрации Cu, Zn и Cd в объектах трофической цепи озер сопоставимы (рис. 3) несмотря на различия в размерах объектов.

Аналогичные результаты были получены при изучении переноса металлов (Cd, Zn, Cu, Pb) по трофической цепи планктон–моллюски (*Kunashiria*) из пресных лагунных озер восточной части хребта Сихотэ-Алиня (Чернова, Лысенко, в печати). Только в оз. Круглом наблюдается рост концентрации Cd от планктона к моллюскам, что требует дополнительных исследований.

Металлы, концентрации которых снижаются по трофической цепи в приморских озерах, содержатся в воде преимущественно во взвешенной форме (Fe, Pb), либо их количество сопоставимо с количеством растворенных элементов (Mn, Ni), кроме того, концентрации этой группы элементов повышены во взвеси по сравнению с планктоном (Чернова и др., 2014). Взвешенные частицы моллюски сортируют, неорганическую часть вместе с преобладающими в ней элементами (Fe, Mn, Ni, Pb) удаляют с псевдо-фекалиями, поэтому количество этих элементов уменьшается по трофической цепи. Органическую часть взвеси, в том числе бактерии и планктон вместе с заключенными в них металлами, моллюски используют в качестве пищи. Это одна из причин, по которой концентрация Cu, Zn и Cd по трофической цепи не увеличивается, хотя и не уменьшается.

Отсутствие снижения концентрации Cu, Zn и Cd по пищевой цепи может быть также связано с экологическими особенностями корбикул — обитанием в мягких грунтах. Содержание металлов в поровых водах мягких грунтов и в придонном слое воды существенно выше, чем в толще водной среды (Хажеева и др., 2004; Урбазаева и др., 2014).

Тенденция изменения концентраций Cu, Zn и Cd в организмах трофической цепи фитопланктон–зоопланктон–зообентос (брюхоногие и двустворчатые моллюски — фитотофаги и фильтраторы) из чистых станций оз. Тайху, Китай (Tao et al., 2012a) была сходной с таковой в приморских озерах. В загрязненных металлами станциях этого озера концентрации Cu, Zn и Cd, а также Pb снижались по трофической цепи. Концентрации Cd, Pb, Cu в зоопланктоне (70–290 мкм) из загрязненной металлами эстуарной зоны зал. Гуанабарра, Бразилия (Kehrig et al., 2009) были сопоставимы (на 2 станциях) либо выше (на 4 станциях), чем в фитопланктоне соответственно в 1–10, 1–2, 1–4 раза.

Про зал. Гуанабарра известно, что это очень эвтрофицированная акватория (Kehrig et al., 2009), следовательно, с высоким содержанием органического углерода. Зоопланктон питается не только фитопланктонными водорослями, но и детритом, и бактериями, которые при фильтрации попали в группу сестона (< 1,2 мкм) и отличаются очень высокими концентрациями микроэлементов (Kehrig et al., 2009). Возможно, именно питание пищей не только с низкими (планктон), но и с высокими (бактерии и детрит сестона) концентрациями микроэлементов явилось причиной увеличения содержания металлов в зоопланктоне относительно фитопланктона в зал. Гуанабарра.

Оз. Тайху и приморские солоноватоводные озера также различаются по содержанию взвешенного и растворенного органического вещества. В приморских озерах количество растворенного $C_{\text{орг}}$ составляет 2,5–7,2 мг/л, взвешенного $C_{\text{орг}}$ — 0,25–3,65 мг/л ($0,64 \pm 0,63$ мг/л для озер Духовского, Мраморного, Круглого и $2,28 \pm 1,05$ мг/л для оз. Благодати). В оз. Тайху концентрации $C_{\text{орг}}$ — 15–69 мг/л (Tao et al., 2012b). Содержание ВВ в приморских озерах 1,7–11,0 мг/л, в оз. Тайху $\approx 7,9$ –40,0 мг/л (соответствует 13,6–69,9 NTU* (Tao et al., 2012b)). Скорость фильтрации моллюсков и концентрация взвешенных в воде частиц связаны обратной зависимостью, в области низких концентраций, близких к природным, скорость фильтрации максимальна (Алимов, 1981). Средняя концентрация взвешенного $C_{\text{орг}}$ в озерах Духовском и Круглом, в которых одновременно изучено содержание металлов в моллюсках и планктоне, примерно соответствует области природных концентраций взвешенного $C_{\text{орг}}$ (2 мгО/л) из работы А.Ф. Алимова (1981). Вероятно, моллюски приморских лагунных озер имеют более высокую скорость фильтрации, чем моллюски оз. Тайху и зоопланктон зал. Гуанабарра. Благодаря этому моллюски могут накапливать более высокие, сопоставимые

* NTU — нефелометрические единицы измерения. 1 NTU = 0,58 мг/л (ГОСТ 3351-74).

с планктоном, концентрации Zn, Cu, Cd. При более высоких концентрациях $C_{орг}$ в воде скорость фильтрации организмов снижается, и даже при повышенных концентрациях микроэлементов в воде их накопление будет осуществляться медленнее. Соответственно, конечные концентрации элементов в организмах будут ниже по сравнению с их пищевыми объектами, как в оз. Тайху. Вероятно, это одна из причин снижения коэффициентов биоаккумуляции металлов в организмах по мере роста концентрации металлов в воде, установленного Де-Форестом с соавторами (DeForest et al., 2007) на основе литературных данных. Питание объектами, обогащенными металлами и высоким содержанием $C_{орг}$, как в зал. Гуанабарра, даже при условии уменьшения скорости фильтрации приводит к росту содержания элементов по трофической цепи.

Заключение

Соотношение форм содержания металлов в водной среде, количество питательного взвешенного органического вещества, экологические особенности среды обитания организмов и площадь их удельной поверхности являются ведущими факторами в формировании тенденций изменения содержания металлов по водной трофической цепи.

В условиях низких концентраций микроэлементов и взвешенного органического вещества в воде лагунных солоноватоводных озер побережья Японского моря в трофической цепи фитопланктон–моллюски наблюдается понижение содержания Fe, Mn, Ni, Pb и сопоставимые концентрации Cu, Zn и Cd. Понижение содержания Fe, Mn, Ni, Pb связано с увеличением удельной площади поверхности организмов более высокого трофического уровня и преобладанием этих элементов в воде во взвешенной форме (и на неорганической части взвеси в частности). Сопоставимые концентрации Cu, Zn и Cd в планктоне и моллюсках озер определяются преобладанием растворенной формы этих элементов в воде, в органической части взвеси (пище моллюсков), высокой скоростью фильтрации моллюсков, экологическими особенностями обитания корбикул в мягких грунтах.

Авторы благодарят химиков-аналитиков ТИГ ДВО РАН Г.А. Власову, Д.С. Рыжакову, Н.Н. Богданову за помощь в определении металлов; к.г.н. Т.Н. Луценко за определение органического углерода, ст.н.с. БПИ ДВО РАН Л.А. Медведеву за определение фитопланктона, сотрудников Сихотэ-Алинского биосферного государственного заповедника к.б.н. Е.В. Потиху, И.А. Нестерову за помощь в полевых работах.

Определение тяжелых металлов в организмах выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 14050-00034). Обсуждение материала выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (соглашение № 16-05-00166).

Список литературы

Айздайчер Н.А., Гостюхина О.Б. Совместное влияние солености и загрязнения среды бихроматом калия на адаптивные возможности диатомовой бентосной микроводоросли *Attheya ussurensis* в лабораторных условиях // Изв. ТИНРО. — 2015. — Т. 182. — С. 183–189.

Алимов А.Ф. Функциональная экология пресноводных двусторчатых моллюсков : моногр. — Л. : Наука, 1981. — 248 с.

Бурдин К.С., Крупина М.В., Савельев И.Б. Физиологические механизмы регулирования содержания тяжелых металлов в морских водорослях // Вестн. МГУ. Сер. 16, Биология. — 1990. — № 2. — С. 35–42.

Войткевич Г.В., Мирошников А.Е., Поваренных А.С., Прохоров В.Г. Краткий справочник по геохимии. — М. : Недра, 1977. — 184 с.

Леонова Г.А., Бобров В.А. Геохимическая роль планктона континентальных водоемов Сибири в концентрировании и седиментации микроэлементов : моногр. — Новосибирск : ГЕО, 2012. — 314 с.

Луценко Т.Н., Чернова Е.Н., Лысенко Е.В. Органическое вещество малых озер северо-востока Приморья // Чтения памяти В.Я. Леванидова. — Владивосток : Дальнаука, 2014. — Вып. 6. — С. 408–414.

Сиротский С.Е., Чижикова Н.П., Харитоновна Г.В., Уткина Г.В. Микроэлементы в водных экосистемах бассейна р. Амур // Биогеохимические и гидроэкологические параметры наземных и водных экосистем. — Хабаровск : ИВЭП ДВО РАН, 2011. — С. 116–124.

Урбазаева С.Д., Павлов И.А., Раднаева Л.Д. Микроэлементный состав поровых вод донных отложений дельты р. Селенга // Вестн. ВСГУТУ. — 2014. — Т. 4, № 49. — С. 176–179.

Хажеева З.И., Урбазаева С.Д., Бодоев Н.В. и др. Тяжелые металлы в воде и донных отложениях дельты р. Селенги // Вод. ресурсы. — 2004. — Т. 31, № 1. — С. 69–72.

Чернова Е.Н., Лысенко Е.В. Содержание металлов в организмах разных трофических уровней в условиях пресноводных озер Восточного Сихотэ-Алиня // Вод. ресурсы (в печати).

Чернова Е.Н., Шулькин В.М., Лысенко Е.В. и др. Гидрохимические и биогеохимические особенности пресных и солоноватоводных озер восточного Сихотэ-Алиня // Изв. ТИНРО. — 2014. — Т. 178. — С. 157–172.

Чудаева В.А. Миграция химических элементов в водах Дальнего Востока : моногр. — Владивосток : Дальнаука, 2002. — 392 с.

Шулькин В.М., Богданова Н.Н., Перепелятников Л.В. Пространственно-временная изменчивость химического состава речных вод юга Дальнего Востока РФ // Вод. ресурсы. — 2009. — Т. 36, № 4. — С. 428–439.

Campbell L.M., Norstrom R.J., Hobson K.A. et al. Mercury and other trace elements in a pelagic Arctic marine food web (Northwater Polynya, Baffin Bay) // Science of the Total Environment. — 2005. — Vol. 351. — P. 247–263.

Chen C.Y., Stemberger R.S., Klaue B. et al. Accumulation of heavy metals in food web components across a gradient of lakes // Limnology and Oceanography. — 2000. — Vol. 45, № 7. — P. 1525–1536.

Cui B., Zhang Q., Zhang K. et al. Analysing trophic transfer of heavy metals for food webs in the newly-formed wetlands of the Yellow River Delta, China // Environ. Pollut. — 2011. — Vol. 159. — P. 1297–1306.

DeForest D.K., Brix K.V., Adams W.J. Assessing metal bioaccumulation in aquatic environments: The inverse relationship between bioaccumulation factors, trophic transfer factors and exposure concentration // Aquatic Toxicology. — 2007. — Vol. 84, № 2. — P. 236–246.

Dehn L.A., Follmann E.H., Thomas D.L. et al. Trophic relationships in an Arctic food web and implications for trace metal transfer // Science of the Total Environment. — 2006. — Vol. 362. — P. 103–123.

Dietz R., Riget F., Cleemann M. et al. Comparison of contaminants from different trophic levels and ecosystems // Science of the Total Environment. — 2000. — Vol. 245. — P. 221–231.

Kehrig H.A., Palermo E.F.A., Seixas T.G. et al. Trophic transfer of methylmercury and trace elements by tropical estuarine seston and plankton // Estuarine, Coastal and Shelf Science. — 2009. — Vol. 85. — P. 36–44.

Monferrán M.V., Garneró P., de los Angeles Bistoni M. et al. From water to edible fish. Transfer of metals and metalloids in the San Roque Reservoir (Córdoba, Argentina). Implications associated with fish consumption // Ecological Indicators. — 2016. — Vol. 63. — P. 48–60.

Rubio-Franchini I., Rico-Martínez R. Evidence of lead biomagnification in invertebrate predators from laboratory and field experiments // Environmental Pollution. — 2011. — Vol. 159. — P. 1831–1835.

Tao B.Y., Yuan Z., Xiaona H., Wei M. Distribution and bioaccumulation of heavy metals in aquatic organisms of different trophic levels and potential health risk assessment from Taihu lake, China // Ecotoxicology and Environmental Safety. — 2012a. — Vol. 81. — P. 55–64.

Tao A.Y., Yuan Z., Wei M., Xiaona H. Characterization of heavy metals in water and sediments in Taihu Lake, China // Environ. Monit. Assess. — 2012b. — Vol. 184, № 7. — P. 4367–4382.

Поступила в редакцию 18.07.16 г.