

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЕРЕНОСА МИКРОЭЛЕМЕНТОВ ПО ТРОФИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЛАНКТОН – МОЛЛЮСКИ

Содержание микроэлементов (Pb, Zn, Cd, Cu) изучено в организмах трофической цепи планктон – моллюски-фильтраторы из лагунных озер побережья Японского моря в сравнении с литературными данными. Показано, что перераспределение микроэлементов по трофической цепи продуценты – консументы первого порядка зависит от удельной площади поверхности, содержания в воде и пище микроэлементов и взвешенного органического вещества, а также от формы существования элемента в воде.

В лагунных озерах побережья Японского моря микроэлементы не накапливаются по пищевой цепи планктон – моллюски: содержание Pb снижается, что связано с уменьшением удельной площади поверхности консументов и, вероятно, с преобладающей взвешенной формой элемента в воде. Содержание Zn, Cu и Cd практически не изменяется, несмотря на уменьшение удельной площади поверхности. Это связано с высокой скоростью фильтрации консументов, которая обеспечивается низким содержанием взвешенного органического углерода и тяжелых металлов в воде. Концентрации Pb, Cu и Cd в консументах – фильтраторах из загрязненных металлами и органическим веществом водоемов может повышаться, несмотря на снижение удельной площади поверхности консументов и более низкую скорость фильтрации, за счет питания компонентами с разным исходным содержанием микроэлементов.

Ключевые слова: микроэлементы, трофическая цепь, планктон, двустворчатые моллюски, лагунные озера побережья Японского моря.

Концентрационная функция живого вещества, выделенная В.И. Вернадским, заключается в избирательном накоплении организмами из среды определенных химических элементов, необходимых для функционирования – биоэлементов. Вместе с ними накапливаются и элементы со сходными химическими свойствами, но биологические функции которых вызывают сомнение или не определены. Накопление элементов организмами из водной среды происходит как через поверхность тела, так и через пищу с коэффициентами аккумуляции 10^3 – 10^6 [9].

Водная среда, так же, как и воздушная, загрязняется химическими веществами в процессе функционирования техногенных систем, созданных человеком. Любой химический элемент, в том числе и биологически необходимый, находящийся в избытке, может проявлять токсичные свойства. Поэтому важно понимать при каких условиях элементы способны переноситься по трофической цепи на вышестоящие трофические уровни, включая человека, обогащая либо загрязняя их.

Известно, что ртуть однозначно накапливается по водной трофической цепи [7], [8], [10], [11]. По поводу накопления других микроэле-

ментов, как биофильных, так и токсичных, существует немало противоречивых сведений [8], [13], [15]. Для понимания причин, вызывающих накопление элементов по трофической цепи, необходимо его изучить с учетом геохимических, биологических и других условий водоема.

Целью данной работы было исследовать закономерности переноса микроэлементов Zn и Cu и тяжелых металлов Cd и Pb по трофической цепи планктон – организмы-фильтраторы из лагунных озер побережья Японского моря, восточной части хребта Сихотэ-Алинь в сравнении с литературными данными.

Мелкие озера лагунного, иногда тектонического происхождения сосредоточены вдоль малонаселенного открытого япономорского побережья Приморского края в нижней части речных долин, прорезающих хребет Сихотэ-Алинь перпендикулярно береговой черте. Они образованы при совокупном участии флювиальных и прибрежно-морских экзогенных процессов. Часть озер окончательно отделилась от моря штормовым валом, часть осталась связана с морем постоянными или временными протоками. В народном хозяйстве используется только оз. Васьковское в качестве источника

питьевого водоснабжения. Ряд озер находится на охраняемой территории Сихотэ-Алинского Государственного природного биосферного заповедника (САБЗ) (рис. 1).

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

Результаты химического анализа воды, взвешенного вещества озер представлены в работах [5], [6].

Суммарный микрофито- и зоопланктон отбирали, облавливая подповерхностный слой воды озер с весельной лодки в течение 5 минут планктонной капроновой сетью Апштейна с ячейей 0,1 мм (№ сита 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). Озерный фитопланктон представлял собой в основном диатомовые водоросли, зоопланктон состоял из ветвистоусых и веслоногих ракообразных [5]. Зеленый цвет фильтров свидетельствовал о преобладании фитопланктона в пробах.

Десять двустворчатых моллюсков с одного места сбора с глубины 1,5–2 м, добытых с помощью трубки и маски, очищали от обрастаний, выдерживали 48 часов в чистой воде с места сбора, отделяли мягкие ткани от раковины, высушивали. Ткани каждой особи кунаширий (длина раковины 60–80 мм) анализировали как отдельную пробу, мелкие корбикулы (длина раковины 25–35 мм) объединяли в 3–5 проб по 5 экземпляров.

Высушенные и измельченные 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 сме-

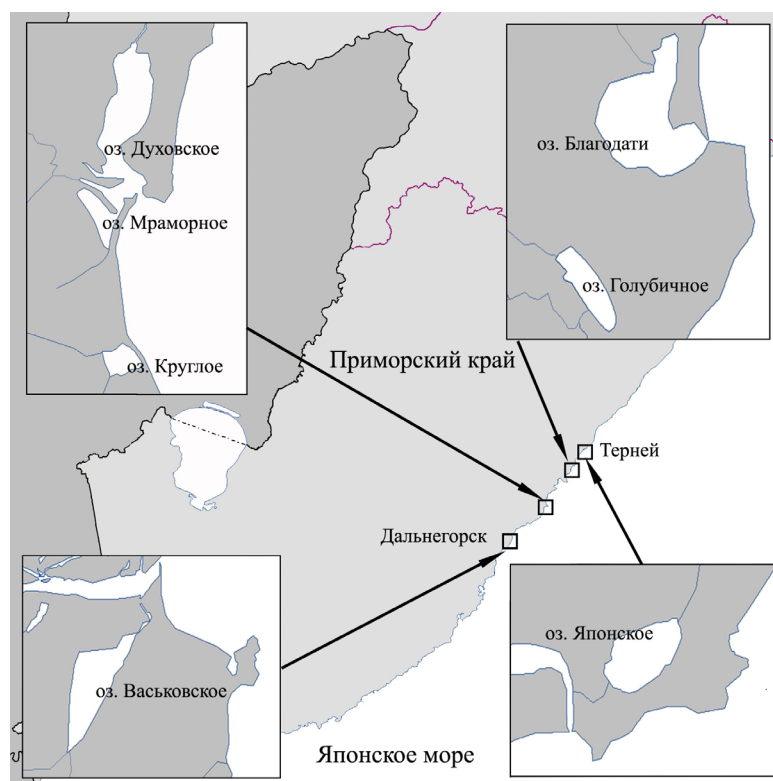


Рисунок 1 – Карта-схема расположения лагунных озер япономорского побережья Приморского края (озер восточного Сихотэ-Алиня (ВСА))

сью $\text{HF}+\text{HClO}_4$. Содержание металлов определяли атомно-абсорбционным методом на приборе Shimadzu 6800 в лаб. геохимии ТИГ ДВО РАН в пламенном (Zn, Cu, Cd) и беспламенном (Pb) вариантах.

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

В анализе использовали средние значения параметров для озер, полученные за 3 года. Проверку достоверности различий между концентрациями металлов в зависимых выборках компонентов трофической цепи озер (взвесь планктон и планктон-моллюски) проводили с помощью непараметрического критерия Вилкоксона в программе Statistica 6.0.

Большую роль в накоплении металлов организмами играет удельная площадь поверхности контакта со средой – чем мельче организм, тем выше его удельная площадь поверхности, тем выше концентрации металлов [2], [14]. Помимо уменьшения удельной площади поверхности, на динамику содержания микроэлементов по трофической цепи может оказывать скорость фильтрации, которая, в свою очередь, зависит от содержания в воде пищи. Недостаток пищи (органического вещества) способствует увеличению скорости и времени фильтрации организмов. Избыток пищи способствует уменьшению скорости фильтрации [1]. Скорость фильтрации снижается также при наличии в воде повышенных концентраций токсичных веществ. Известно, что в среде с повышенными концентрациями микроэлементов коэффициент их аккумуляции зоо- и фитобентосом снижается [9].

Рассмотрим перенос Zn, Cu, а также Cd и Pb по трофической цепи планктон (фито- и зоопланктон) – моллюски-фильтраторы из лагунных озер побережья Японского моря (рис. 2). Воды лагунных озер имеют низкие концентрации взвешенного и органического веществ,

микроэлементов в воде и взвешенном веществе (ВВ) [6]. Содержание ВВ в лагунных озерах 1,7–11 мг/л. Количество растворенного органического углерода (РОУ) составляет 2,4–7,9 мг/л, взвешенного углерода – 0,3–2,7 мг/л, что составляет 8–26,6% от массы ВВ (до 40% в озерах с заболоченным водосбором) [5].

Взвешенное вещество (ВВ) лагунных озер побережья Японского моря, полученное нами фильтрованием через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм – это смесь из минеральной взвеси, органического детрита, микроорганизмов, фитопланктона и простейших, которая используется для питания организмов более высоких трофических уровней, кроме фитопланктона. Проба планктона представляет собой смесь живых организмов и частиц детрита размером от 100 мкм до 1–2 мм, отловленных сетью Джеди в толще воды. Среднее содержание углерода в планктоне составляет 34,5–40% [3].

Содержание Zn, Cu, Cd и Pb во ВВ и планктоне лагунных озер, как правило, было сопоставимо (рис. 2). Достоверная тенденция снижения содержания элемента по трофической цепи фитопланктон – моллюски-фильтраторы наблюдается для Pb – в 7–66 раз. Содержание Cu и Zn, а также Cd в планктоне и моллюсках озер сопоставимо (рис. 2).

Чтобы понять полученные закономерности переноса металлов по трофической цепи лагунных озер, рассмотрим их в сравнении с данными, полученными другими авторами для подобных трофических взаимодействий и на объектах с другими гидрохимическими особенностями. Так, воды китайского озера Тайху имеют сопоставимые концентрации микроэлементов, по сравнению с таковыми в лагунных озерах, но отличаются более высоким содержанием взвешенного и органического вещества: концентрации РОУ – 17–36 мг/л, содержание ВВ – 7,9–27,4 мг/л (13,6–47,3 NTU – [17]). РОУ утилизируется в бактериальной пищевой цепи, переходя во взвешенную форму [12]. Авторы изучали перенос металлов по трофической цепи фитопланктон – зоопланктон – моллюски (брюхоногие и двустворчатые моллюски – фитотофаги и фильтраторы) в разных участках озера [17].

Воды залива Гуанабара (Бразилия) чрезвычайно эвтрофированы и содержат высокие концентрации металлов. Авторы изучали перенос микроэлементов Cu, Pb и Cd по трофической цепи сестон (<1,2 μm) – микропланктон (=фи-

топланктон, 1,2–70 μm) – мезопланктон (=зоопланктон, 70–290 μm) [12].

В донных осадках (ДО) озера Тайху концентрации Pb, а также Cu, Zn и Cd находятся в том же диапазоне, что и в планктоне (рис. 2).

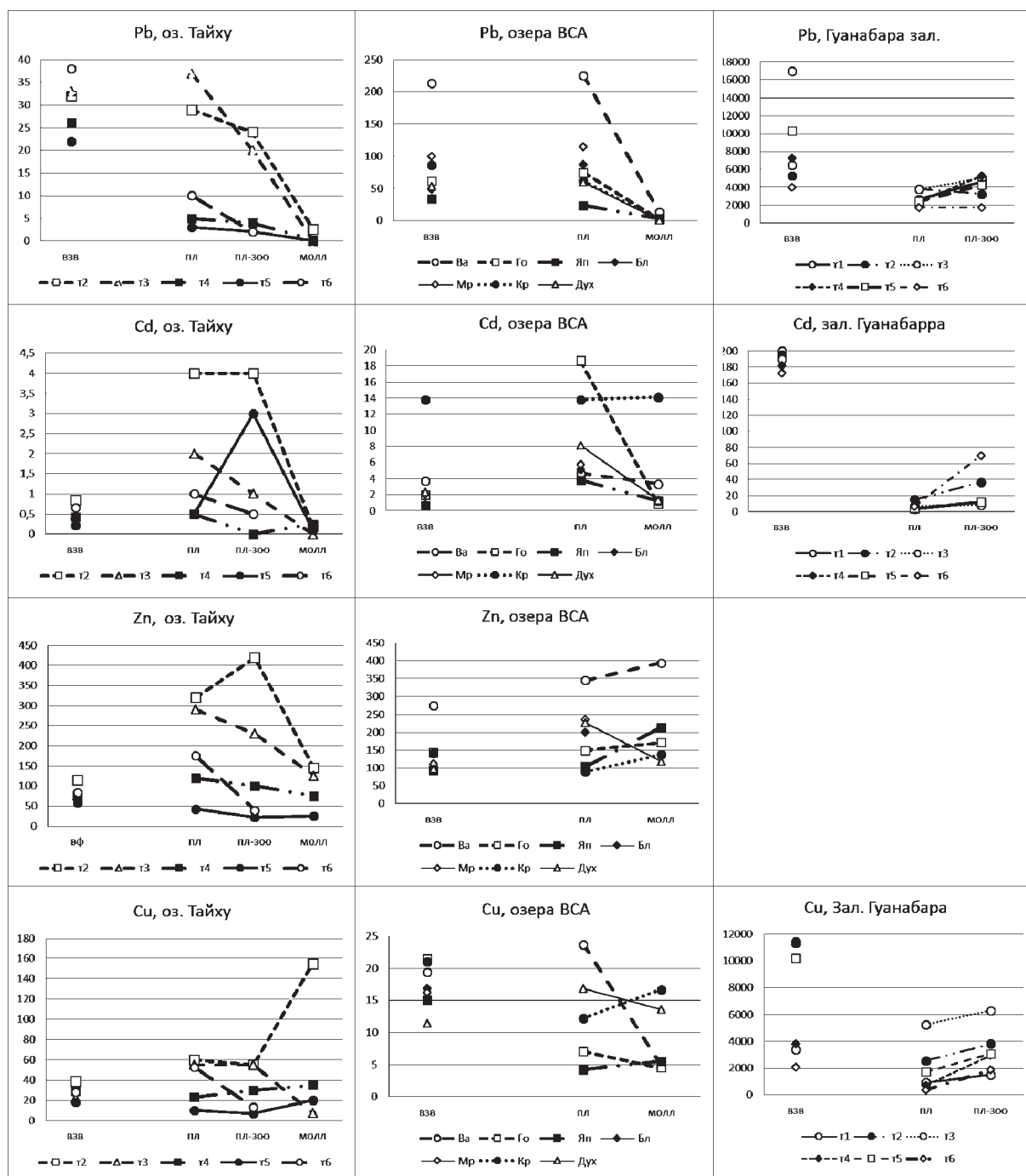


Рисунок 2 – Динамика изменения металлов в элементах трофической цепи планктон - моллюски-фильтраторы
 Обозначения: т 1 – т 6 – обозначения точек отбора проб [13], [17];
 лагунные озера: Ва – Васьковское, Го – Голубичное, Яп – Японское, Бл – Благодати,
 Мр – Мраморное, Кр – Круглое, Дух – Духовское
 ДО – донные осадки, в3в – взвесь, пл-фито – фитопланктон, пл-300 – зоопланктон, молл – моллюски

Концентрации микроэлементов имели тенденцию к снижению по трофической цепи фитопланктон – зоопланктон – зообентос [17] на станциях с более высокими концентрациями металлов (т. 2–3 – [17], рис. 2). Концентрации Cu, Zn и Cd в организмах этой трофической цепи со станций с более низкими концентрациями элементов в среде были сопоставимы (т. 4–6).

В свою очередь, концентрации Cd, Pb, Cu в сестоне из эстуарной, загрязненной металлами и эвтрофированной зоны зал. Гуанабара, Бразилия – в 8-200, 1,6-56 и 4,5-12 раз выше, чем в фитопланктоне [12]. Зоопланктон, в свою очередь, отличался повышенными, относительно фитопланктона, концентрациями микроэлементов (рис. 2).

Вероятно, в озерах побережья Японского моря, в условиях среды с низкими концентрациями металлов, фито- и зоопланктон, а также моллюски-фильтраторы имеют высокие коэффициенты аккумуляции Zn, Cu, Cd из воды и пищи для обеспечения физиологической потребности в микроэлементах. Высокие коэффициенты аккумуляции обеспечиваются высокой скоростью фильтрации при низком содержании взвешенного вещества и взвешенного органического углерода, т.е. пищи. Содержание Pb во ВВ озер выше кларка содержания элемента в литосфере [4], в связи с их размещением на территории с наличием олово-свинцово-цинковых полиметаллических рудопоявлений. В связи с этой особенностью, содержание Pb во взвеси и планктоне лагунных озер сопоставимо или выше, чем в оз. Тайху, и существенно снижается при переходе на следующий трофический уровень (моллюски-фильтраторы), благодаря уменьшению удельной площади поверхности моллюсков. В оз. Тайху наблюдается аналогичная зависимость между содержанием элементов в донных отложениях, фито- и зоопланктоне и моллюсках – сопоставимые концентрации Zn, Cu, Cd и снижение Pb в моллюсках. Возможно, снижение содержания Pb связано еще и с тем, что металлы, которые находятся в воде преимущественно во взвешенной форме (Pb, Fe – [4]), агрегируются фильтраторами в пеллеты-псевдофекалии и удаляются из организмов. Содержание металлов в планктоне и моллюсках со станций оз. Тайху с низкими концентрациями элементов практически не

изменяется, так как, очевидно, достигло у моллюсков величины физиологического оптимума. При этом на станциях озера с более высокими концентрациями металлов и органического вещества последнее способствует снижению скорости фильтрации и содержания металлов с бицидными свойствами в мягких тканях моллюсков и зоопланктеров (Pb, Cd).

Другая картина наблюдается в трофической цепи эвтрофированного и загрязненного металлами залива Гуанабарра. Очень высокие концентрации Cd, Pb и Cu (Zn не изучался) в сестоне существенно снижаются в фитопланктоне и несколько возрастают в зоопланктоне (рис. 2). Возможно, причина снижения содержания металлов в планктоне из залива Гуанабарра, по сравнению с сестоном – регулирование накопления металлов живыми организмами, начинающее действовать в условиях загрязнения среды обитания. Избыток пищевых частиц стимулирует организмы консументов снижать скорость и время фильтрации. Однако, зоопланктон питается не только фитопланктоном, но и детритом, и бактериями, которые попали при фильтрации в группу сестона. Возможно, именно питание смесью из малозагрязненной (планктон) и сильнозагрязненной (бактерии и детрит сестона) металлами пищи явилось причиной роста содержания металлов в зоопланктоне из зал. Гуанабарра, относительно фитопланктона.

Таким образом, динамика содержания металлов в организмах трофической цепи планктон – моллюски-фильтраторы зависит от степени загрязнения водоема металлами и органическим веществом. Коэффициенты биоаккумуляции микроэлементов в организмах-фильтраторах из чистых водоемов повышены и металлы (Zn, Cd, Cu) накапливаются в концентрациях, сопоставимых с таковыми в их пищевых объектах, несмотря на уменьшение удельной площади поверхности. Снижение концентрации Pb с уменьшением площади поверхности организмов более высокого уровня трофической цепи сохраняется как в чистой, так и загрязненной металлами и органическим веществом среде. Возможно, это связано с тем, что металлы, которые находятся в воде преимущественно во взвешенной форме (Fe, Pb), агрегируются фильтраторами в пеллеты-

псевдофекалии и удаляются из организмов. Изменение концентраций Cu, Pb и Cd в организмах трофической цепи из загрязненной металлами и органическим веществом среды существенно зависит не только от изменения удельной площади поверхности и вариаций скорости филь-

трации, но и от степени загрязнения микроэлементами пищевых частиц. В загрязненной среде содержание элементов в консументах первого порядка может повышаться, по сравнению с продуцентами.

04.10.2016

**Пробоподготовка материала выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда (соглашение № 14-50-00034),
обсуждение результатов – при поддержке Российского фонда
фундаментальных исследований (соглашение № 16-05-00166)**

Список литературы:

1. Алимов, А.Ф. Функциональная экология пресноводных двусторчатых моллюсков / А.Ф. Алимов. – Л.: Наука. –1981. – 248 с.
2. Бурдин, К.С. Тяжелые металлы в водных растениях (аккумуляция и токсичность) / К.С. Бурдин, Е.Ю. Золотухина. – М.: Диалог МГУ. – 1998. – 202 с.
3. Леонова, Г.А. Геохимическая роль планктона континентальных водоемов Сибири в концентрировании и седиментации микроэлементов / Г.А. Леонова, В.А. Бобров. – Новосибирск: Академическое издательство «ГЕО». – 2012. – 314 с.
4. Лысенко, Е.В. Перенос тяжелых металлов по трофической цепи планктон – моллюски-фильтраторы в солоноватоводных лагунных озерах побережья Японского моря / Е.В. Лысенко, Е.Н. Чернова // Известия ТИНРО, 2016. – Т. 187, в печати.
5. Луценко, Т.Н. Органическое вещество малых озер северо-востока Приморья / Т.Н. Луценко, Е.Н. Чернова, Е.В. Лысенко // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова, 2014. – Владивосток : Дальнаука. – С. 408–414.
6. Геохимические и биогеохимические особенности пресных и солоноватоводных озер восточного Сихотэ-Алиня / Е.Н. Чернова и др. // Известия ТИНРО. – 2014. – Т. 178. – С. 157–172.
7. Mercury and other trace elements in a pelagic Arctic marine food web (Northwater Polynya, Baffin Bay) / L.M. Campbell et al. // Science of the Total Environment. – 2005. – V. 351. – P. 247–263.
8. Analyzing trophic transfer of heavy metals for food webs in the newly-formed wetlands of the Yellow River Delta, China / B. Cui et al. // Environmental Pollution. – 2011. – V. 159. – P. 1297–1306.
9. DeForest, D.K. Assessing metal bioaccumulation in aquatic environments: The inverse relationship between bioaccumulation factors, trophic transfer factors and exposure concentration / D.K. DeForest, K.V. Brix, W.J. Adams // Aquatic Toxicology. – 2007. – V. 84. – P. 236–246.
10. Trophic relationships in an Arctic food web and implications for trace metal transfer / L.A. Dehn et al. // Science of the Total Environment. – 2006. – V. 362. – P. 103–123.
11. Comparison of contaminants from different trophic levels and ecosystems / R. Dietz et al. // Science of the Total Environment. – 2000. – V. 245. – P. 221–231.
12. Trophic transfer of methylmercury and trace elements by tropical estuarine seston and plankton / H.A. Kehrig et al. // Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 2009. – Vol. 85. – P. 36–44.
13. From water to edible fish. Transfer of metals and metalloids in the San Roque Reservoir (Córdoba, Argentina). Implications associated with fish consumption / M.V. Monferrán et al. // Ecological Indicators. – 2016. – V. 63. – P. 48–60.
14. Joiris C.R. Heavy metals in the bivalve *Anadara (Senilia) senilis* from Nigeria / C.R. Joiris, M.I. Azokwu // Marine Pollution Bulletin. – 1999. – V. 38. – №7. – P. 618–622.
15. Rubio-Franchini I. Evidence of lead biomagnification in invertebrate predators from laboratory and field experiments / I. Rubio-Franchini, R. Rico-Martínez // Environmental Pollution. – 2011. – V. 159. – P. 1831–1835.
16. Characterization of heavy metals in water and sediments in Taihu Lake, China / Y. Tao et al. // Environ Monit Assess – 2012. – V. 184. – P. 4367–4382.
17. Distribution and bioaccumulation of heavy metals in aquatic organisms of different trophic levels and potential health risk assessment from Taihu lake, China / Y. Tao et al. // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2012. – V. 81. – P. 55–64.

Сведения об авторах:

Чернова Елена Николаевна, старший научный сотрудник лаборатории геохимии Тихоокеанского института географии Дальневосточного Отделения РАН, кандидат биологических наук, доцент, доцент базовой кафедры химических и ресурсосберегающих технологий Школы естественных наук ДВФУ 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7, e-mail: elena@tig.dvo.ru

Лысенко Евгения Валерьевна, младший научный сотрудник лаборатории геохимии Тихоокеанского института географии Дальневосточного Отделения РАН 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7, e-mail: lysenko_tig@mail.ru