

**РОЛЬ ХИРОНОМИД (DIPTERA, CHIRONOMIDAE)
В БИОЛОГИЧЕСКОЙ МИГРАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ
В ЭКОСИСТЕМЕ АНТРОПОГЕННЫХ ВОДОЕМОВ**

О.К. Клишко¹, Д.В. Авдеев², В.Е. Зазулина², С.В. Борзенко¹

¹ *Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН ул. Бутина, 26. Чита, 672090, Россия E-mail: root@cinr.chita.su*

² *Институт тектоники и геофизики ДВО РАН Хабаровский инновационно-аналитический центр ул. Ким-Ю-Чена, 65, Хабаровск 680000, Россия. E-mail: nick@itig.as.khb.ru*

Получены данные о концентрации и особенностях биологической аккумуляции химических элементов у личинок, экзвивев куколок и имаго *Chironomus plumosus*. Анализируется миграция ионов металлов от личинки до имаго и через популяцию хирономид в экосистеме антропогенного водоема.

**CHIRONOMID (DIPTERA, CHIRONOMIDAE) PART
OF BIOLOGICAL MIGRATION OF CHEMICAL ELEMENTS
IN ANTHROPOGENIC WATER-BODIES ECOSYSTEMS**

O.K. Klishko¹, D.V. Avdeev², V.E. Zazulina², S.V. Borzenko¹

¹ *Institute of Natural Resources, Ecology and Criology Russian Academy of Siberian Branch, Str. Butina, 26, Chita 672090, Russia. E-mail: root@cinr.chita.su*

² *Institute of tectonics and geophysics Russian Academy of Far East Branch, Habarovsk innovatory-analytical centre, Str. Kim-Yu-Chena, 65, Habarovsk 680000, Russia. E-mail: nick@itig.as.khb.ru*

Data about the concentration and a peculiarity of the biological accumulation of a chemical elements in the different stage development of a chironomids (larva, pupa and adult) *Chironomus plumosus* and migration metal ions through of it population in the reservoir ecosystem are received. The quantitative estimate of role of *Ch. plumosus* as a species-toxicide are present.

Научные и практические проблемы, связанные с химическим загрязнением окружающей среды, становятся все более актуальными в связи с усилением техногенного воздействия на природную среду. Загрязнения водных объектов промышленными и хозяйственно-бытовыми сбросами изменяет качество их вод, делает непригодными для рыбохозяйственных, рекреационных и даже промышленных целей. В последнем случае уже требуются дополнительные мероприятия по химической водоподготовке поступающих на агрегаты водных масс, что представляет дополнительное химическое загрязнение сбросных вод химическими реагентами, усиливающееся еще и тепловым влиянием при эксплуатации теплоэнергетических станций.

Экосистемы водоемов-охладителей, используемые для охлаждения конденсаторов энергоблоков ТЭС, без сомнения, относятся к наиболее технозависимым и сильно подверженным антропогенному воздействию. Негативные последствия такого воздействия проявляются в ухудшении качества вод, повышении минерализации, эвтрофикации, усилении зарастаемости высшей водной растительностью, заилении, загрязнении ток-

сичными химическими элементами, в числе которых особую роль играют тяжелые металлы, имеющие тенденцию накапливаться в организмах гидробионтов. Самоочищаемая способность природных вод зависит от разнообразия и структурно-функциональных характеристик биоты экосистем, интенсивности процессов бионакопления, миграции и трансформации токсикантов, которые по мере загрязнения водоемов, включаясь в биотический круговорот, со временем становятся балластом и начинают противодействовать естественному протеканию природных самоочищающих процессов (Никаноров и др., 1985). Благодаря жизнедеятельности гидробионтов, обладающих разнообразными механизмами адаптаций к изменению условий среды, в том числе антропогенного характера, водоемы-охладители отнюдь не представляют собой мертвые водоемы. Их экосистемы в условиях многообразия антропогенного воздействия достаточно устойчиво функционируют.

Для решения проблемы устойчивого функционирования водных экосистем антропогенно зависимых водоемов весьма актуальными являются исследования процессов биологической миграции химических элементов, их аккумуляции и трансформации внутри самой экосистемы; изучение и оценка роли популяций и сообществ гидробионтов в выведении из экосистемы химических элементов, т. е. их роли в детоксикации техногенных водоемов. Такие исследования и являются целью данной статьи.

Работы по изучению биологического накопления химических элементов разными видами и группами водных беспозвоночных немногочисленны, они относятся к водоемам Европы, где эта проблема приняла особенно острый характер. Исследования, посвященные количественной оценке участия отдельных видов в процессах аккумуляции и регенерации химических элементов, единичны, они касаются главным образом моллюсков-фильтраторов (Тодераш, 1991; Киричук, 2003; Яковлев, 2003; Брень, Домашлинец, 1998 и др.).

В настоящей статье приведена количественная оценка роли хирономид (*Chironomus plumosus* L.) в биологической миграции химических элементов в одном из регионов Сибири. Это обычно наиболее массовый вид хирономид в антропогенно зависимых водоемах, он представляет собой вид-индикатор, детоксикатор, несущий основную нагрузку в самоочищении техногенных водоемов.

Материал и методика

Для изучения роли популяции *Ch. plumosus* (мотыля) в процессах биоаккумуляции химических элементов, их трансформации, миграции и выноса из экосистемы с вылетом из водоема имаго, отбирали личинок IV возраста, экзувии, куколок и имаго как самого массового вида хирономид в водоеме-охладителе Читинской ТЭЦ – озере Кенон, расположенном в черте г. Чита. Личинок собирали в конце мая, экзувии куколок и имаго – в начале июня 2004 г. Отбор личинок проводился дночерпателем Петерсена и драгой. Экзувии куколок собирали в прибойной зоне озера, где они скапливались в массе в период массового лета имаго, прибываемые ветром и течением. Имаго отлавливали в прибрежных зарослях кустарников и травянистых растений энтомологическим сачком.

Личинок общей навеской 100 г после отлова выдерживали в течение 12 ч. в пластиковых емкостях (объемом 3 л), заполненных смесью дистиллированной и природной воды в соотношении 2:1 до полного освобождения кишечника. Затем промывали в сачке в проточной водопроводной воде и окончательно споласкивали в дистиллированной воде, затем фиксировали 70 %-ным этанолом. Подсушивали личинок на химически чистых бумажных фильтрах. Также подсушивали экзувии куколок, предварительно промыв в сачке дистиллированной водой. Имаго морились в закрытом сосуде в парах 96 %-го этанола. Подготовленные пробы личинок, экзувиев куколок и имаго доводили до воздушно-сухой массы в сушильном шкафу при температуре 100 °С, при которой исключаются потери металлов из проб (Никаноров и др., 1985). Высушенные пробы тщательно расти-

рали в порошок в агатовой ступке. У исследуемых стадий хирономид определяли соотношения между сырой и сухой массой.

Измерение концентрации определяемых элементов в исследуемых объектах проводилось при помощи масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой ELAN DRC II («Perkin Elmer», США). Главные параметры анализа: расход растворов ~ 1 см³/мин, скорость потока распыляющего газа – 0,82 дм³/мин, время промывки распылительной системы между измерениями – 60 с, время регистрации – 3 с/элемент.

Пробоподготовка заключалась в кислотном разложении образцов в микроволновой системе Multiwave 3000 («Anton Paar», Австрия). Навеску массой 0,05 г взвешивали в тefлоновых реакционных емкостях на весах «Sartorius» СЗ-64, d=0,1 мг. После добавления в емкости 5 мл перегнанной концентрированной HNO₃ и 1 мл 30 %-й H₂O₂ пробы выдерживали на воздухе 30 минут, помещали в автоклав высокого давления и обрабатывали в Multiwave 3000 по следующей программе: нарастание мощности до 1400 Вт в течение 10 мин, удерживание при 1400 Вт 10 мин и охлаждение 30 мин. После разложения содержимое реакционных емкостей переносили в пластиковые колбы на 50 мл и доводили до метки деионизованной водой.

Для приготовления калибровочных растворов использовался 29-элементный стандартный раствор фирмы «Perkin Elmer» с исходной концентрацией 10 мг/мл (10ppm). При определении Ti, V, Cr, Mn, Ni, Co, Cu, Zn, Sr, Mo, Cd, Ba, Pb применялся метод стандартных добавок. Для определения Na, K, Mg и Fe готовилась серия калибровочных растворов в диапазоне от 100 до 1000 мкг/дм³.

Определение концентрации металлов в пробах придонного слоя воды проведено атомно-абсорбционным анализом на приборах «Perkin Elmer» и AAS-3 фирмы Karl Zeiss. Потенциометрическое определение выполнено на pH-метрах фирмы «Rodelkis», Будапешт. Калибровочные растворы готовились из стандартных образцов (ГСО и ГСОРМ) фирмы «Ормет», Екатеринбург.

Результаты и обсуждение

Большинство видов хирономид в природных водоемах ведет активный образ жизни в период вегетационного сезона. В зимнее время при снижении температуры воды жизненные процессы у них замедляются, а при 4–5 °С прекращаются, возобновляясь с повышением температуры воды весной. В термальной зоне оз. Кенон, превращенного в природно-техногенный водоем, активность мотыля в зимнее время замедляется, но не прекращается благодаря поступлению подогретых сбросных вод ТЭЦ. В незамерзающей зимой термальной зоне озера, сбросном и подводящем каналах личинки мотыля активно функционируют в течение всего года. Более того, благодаря высокой величине суммы эффективных температур, за вегетационный период *Ch. plumosus* успевает завершить две генерации.

Максимальной длины и массы личинки мотыля достигают к концу мая перед окукливанием. К моменту завершения личиночной стадии они накапливают в своем теле максимальное количество органических и химических веществ, используемых на рост мягкого тела и образование хитинизированных покровов – экзuvia. Личинки накапливают в своем теле различные химические элементы, в том числе ионы тяжелых металлов, путем разнообразных физиологических и биохимических процессов, поглощая, перераспределяя и трансформируя их в различные соединения и частично выводя во внешнюю среду. Эти процессы зависят как от абиотических факторов среды, так и от биологических особенностей водных животных (Никаноров и др., 1985).

В период роста и развития личинки с I по IV возраст сбрасывают свои покровы (экзувии) при линьке четырежды, а превратившись в куколку, линяют еще раз, превращаясь во взрослое насекомое (имаго). Известно, что богатые кальцием твердые покровы личинок и куколок амфибиотических насекомых являются аккумуляторами тяжелых метал-

лов (Мур, Рамамуртис, 1987). Учесть концентрацию металлов в экзувиях личинок I-IV возрастов технически сложно, они очень тонкие и непрочные. При выборке из проб донных отложений возможно выделить лишь головные капсулы и фрагменты экзувиев. Экзувии же куколок при вылете имагинальной стадии комара остаются на поверхности воды и выносятся в прибрежье. При массовом лете комаров в прибрежье и прибойной зоне обычно скапливается огромное количество экзувиев куколок, которые прибоем выносятся на берег.

По данным химического анализа было установлено, что в теле личинок мотыля IV возраста концентрации химических элементов имеют довольно высокие значения не только по макро-, но и по микроэлементам порядка 165–735 мг/кг сухого вещества (табл. 1). Из элементов биогенов лидирующее положение занимает железо, концентрация которого достигает 4 г/кг сухого вещества тела личинок, около 13 г/кг в экзувиях куколок и лишь 1,3 г/кг сухого вещества в теле имаго. Значительно уступают по величине накопления во всех стадиях метаморфоза Zn, Sr, Mn, Cr, Ni и др. (рис. 1). Из числа исследуемых элементов к жизненно важным относятся Fe, Mg, Mn, Cu, Mo, V, Cr, Co, Ni, Zn. Большинство из них необходимы гидробионтам в низких концентрациях. Высокий уровень их накопления вызывает нарушения в развитии, уродства и даже гибель животных, что часто наблюдалось при наших исследованиях.

Активная аккумуляция микроэлементов, очевидно, происходит на завершающем этапе развития личинок IV возраста – предкуколках, а также на стадии куколки в период ее метаморфоза в имаго. К сожалению, собрать достаточное количество куколок для химического анализа и отследить сроки развития этой стадии не удалось. По различным литературным данным, он длится от нескольких дней до двух недель. Путем несложных расчетов можно вычислить содержание химических элементов в куколке, которое переходит в имаго, за исключением отторгаемого экзувия. Можно сделать предположение о том, что на стадии куколки процесс биоаккумуляции наиболее интенсивный, несмотря на короткий период ее развития в имаго. В этот период в ее теле происходят очень сложные физиологические и биохимические процессы, для которых, по-видимому, необходимы микроэлементы в значительно больших концентрациях. При завершении метаморфоза в ее экзувии сосредоточены высокие концентрации всех исследуемых элементов. Разница в суммарном накоплении химических элементов между водными стадиями мотыля (личинка, куколка) и воздушной (имаго) составляет 46,138 г/кг сухой массы. Миграция элементов из личинки в куколку и далее во взрослое насекомое происходит со значительным снижением их концентрации за счет перехода металлов в отторгаемые экзувии при линьках.

Личинки и куколки мотыля избирательно накапливают необходимые для процессов метаболизма ионы металлов, имеющие важное и видоспецифичное значение в ионообменных процессах (Брень, Домашлинец, 1998). Избирательность накопления их можно представить в виде рядов:

Таблица 1

Концентрация химических элементов у *Chironomus plumosus* в водоеме-охладителе Читинской ТЭЦ оз. Кенон, (мг/кг сухой массы)

Элемент	Личинки	Экзувии куколок	Имаго
Na	8363,72	2561,74	1842,03
Mg	1996,63	1819,07	1524,38
K	8524,11	3042,60	5675,42
Ti	74,65	389,16	16,86
V	7,87	8,99	0,89
Cr	64,12	735,15	12,66
Mn	100,05	240,48	28,83
Fe	3948,87	12974,41	1327,57
Ni	39,62	486,08	15,63
Co	1,83	3,86	0,32
Cu	42,12	49,27	12,35
Zn	118,90	136,85	106,83
Sr	110,99	165,04	35,07
Mo	1,62	3,63	1,07
Cd	0,24	2,32	0,38
Ba	55,91	54,58	18,70
Pb	6,08	7,54	2,02

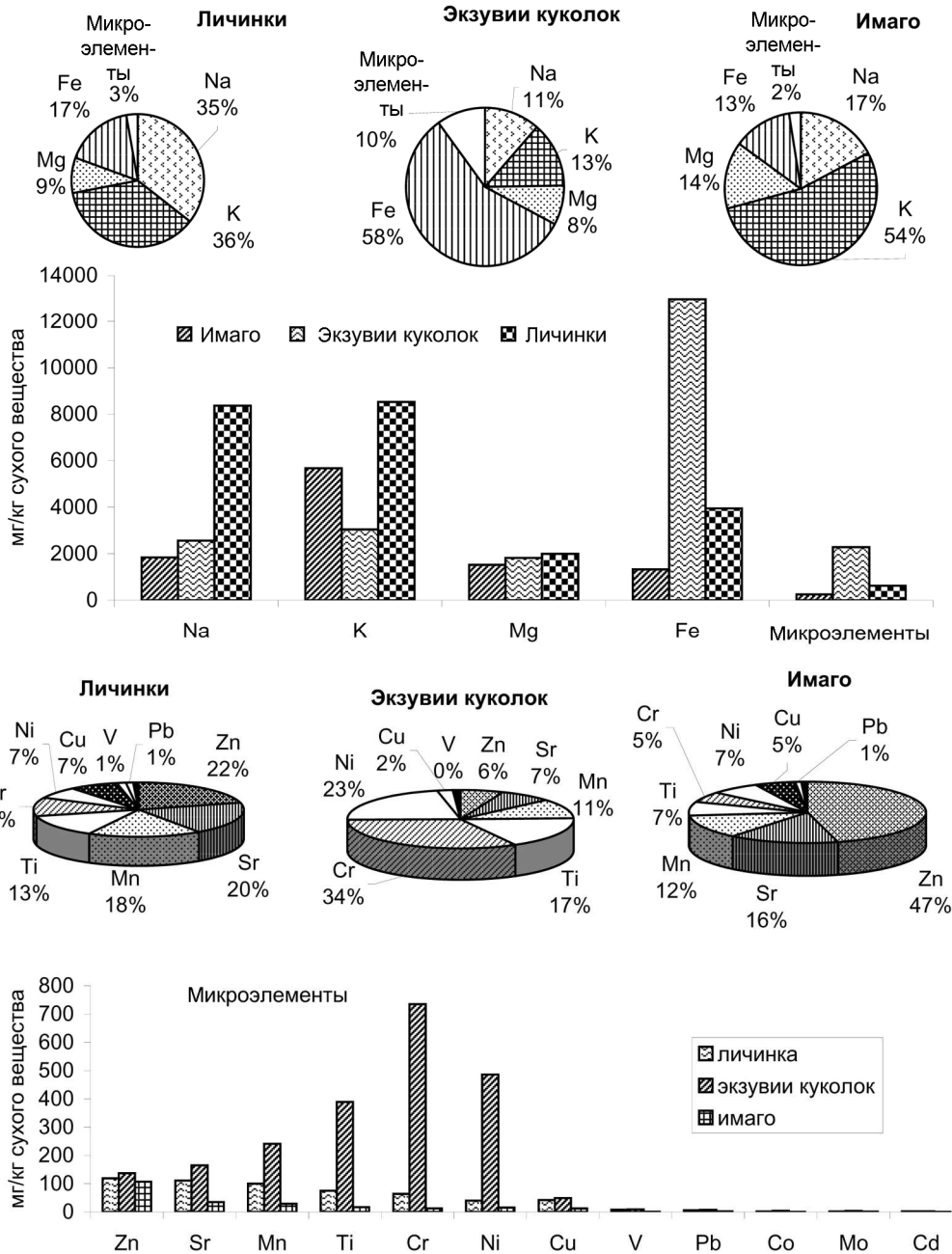


Рис. 1. Концентрация и соотношения ионов металлов у мотыля из водоема-охладителя Читинской ТЭЦ

личинка – K>Na>Fe>Mg>Zn>Sr>Mn>Ti>Cr>Cu>Ni>V>Pb>Co>Mo>Cd;
 куколка – Fe>K>Na>Mg>Cr>Ni>Ti>Mn>Sr>Zn>Cu>V>Pb>Co>Mo>Cd;
 имаго – K>Na>Mg>Fe>Zn>Sr>Mn>Ti>Ni>Cr>Cu>Pb>Mo>V>Cd>Co. Видно, что избирательность в накоплении элементов личинкой почти без изменений сохраняется в имаго, при этом в ряду имаго те же элементы располагаются почти в той же последовательности, мигрируя из личинки через куколку в имаго.

Та же последовательность в избирательности ионов металлов наблюдалась у личинок *Ch. plumosus* из Каховского водохранилища (Брень, Домашлинец, 1998), что под-

тверждает закономерность процесса аккумуляции хирономидами определенных металлов в антропогенных водоемах разных регионов.

Аккумуляция многих микроэлементов у личинок и куколок связана с затратами энергии из-за низкого содержания их в воде, о чем можно судить по коэффициенту биологического накопления (КБН). Самая высокая интенсивность накопления, вычисляемая по отношению концентрации элемента в организме (мг/кг сухой массы) к концентрации этого элемента в природной воде (мг/л), отмечена по Cd – 4000–45000, Ni – 29271, Zn – 11890–24368 (табл. 2). Высокие КБН по Zn у личинок и куколок сопряжены с высоким КБН Cd, Cu, Ni, Pb. Высокий уровень накопления этих элементов может вызвать токсичный эффект, проявляющийся в уродстве, нарушении в развитии и метаморфозе. Известно, что токсичный эффект Zn вызывается примесями мышьяка и кадмия. В наших исследованиях по накоплению металлов у крупных двустворчатых моллюсков из этого же водоема наблюдались подобная связь высоких значений КБН по Zn и Cd и обусловленные этим патологические изменения в развитии моллюсков – мутагенез, уродства и др. (Клишко и др., 2004).

Хирономиды в оз. Кенон являются доминирующей группой донных беспозвоночных, *Ch. plumosus* – абсолютным доминантом среди хирономид (Клишко, 1998). Попытаемся оценить роль этих хирономид в миграции химических элементов и детоксикации водоема.

Накопленные водными стадиями мотыля химические элементы переходят в воздушную стадию взрослых комаров с потерями в экзuviaх. Экзувии личинок остаются в водоеме и с разложением органических составляющих входят в состав донных отложений. Экзувии куколок сносятся к берегам и могут выноситься за пределы водной экосистемы. Имаго, вылетая из водоема, выносят содержащиеся в них химические элементы в воздушную среду. В абсолютных значениях и процентном соотношении основная роль в миграции химических элементов через популяцию хирономид принадлежит макроэлементам Na, K, Mg, Fe, в сумме 91–98 % от общего количества (рис. 2). Среди микроэлементов лидирующее положение принадлежит Cr, Zn, Ni, Ti, Mn. Суммарное количество элементов, накопленных и мигрирующих через разные стадии развития комаров показаны в табл. 3. Миграция и судьба накопленных химических элементов через популяцию мотыля показана на рис. 3. Довольно интересны количественные данные о роли популяции мотыля в накоплении и выносе из водоема химических элементов.

Таблица 3

Суммарные величины накопления и миграции химических элементов через популяцию *Chironomus plumosus*, кг/т сухого вещества

Аккумуляция		Миграция		
личинки	куколки	экзувии личинок	экзувии куколок	имаго
23,457	33,301	0,777	22,68	10,621
-	-	3,31 % от накопления личинкой	68,11 % от накопления куколкой	31,89 % от накопления куколкой

Коэффициент биологического накопления металлов у хирономид *Chironomus plumosus* в оз. Кенон

Элемент	Личинки	Куколки
Na	205,9	92,52
Mg	79,9	133,74
K	1374,9	2027,45
Mn	232,7	626,30
Fe	658,1	3488,29
Ni	2311,5	29271,29
Co	3660,0	8360,00
Cu	10400,0	15212,34
Zn	11890,0	24368,00
Sr	326,4	588,56
Cd	4000,0	45000
Pb	5380,5	8460,18

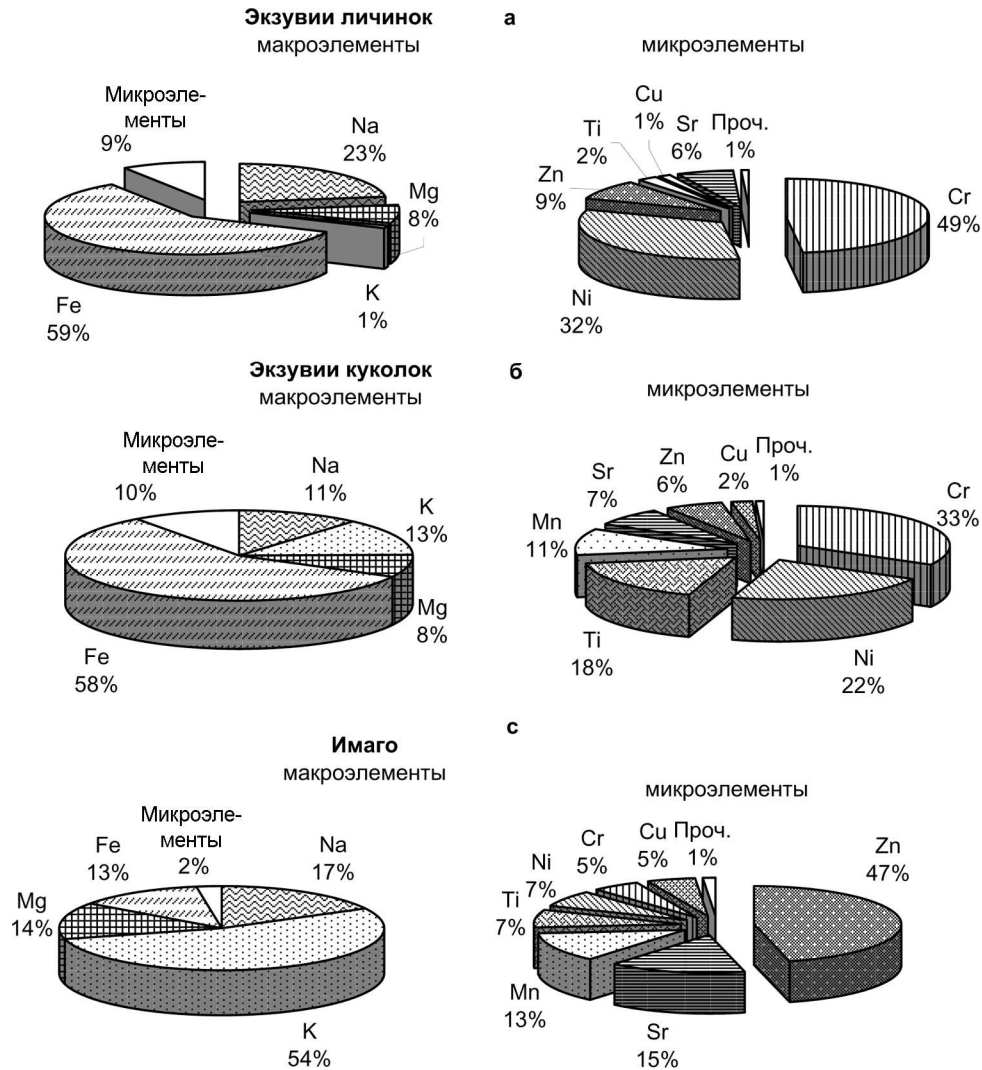


Рис. 2. Соотношение макро- и микроэлементов и их миграция через популяцию мотыля : а – захоронение в донных отложениях, б – вынос из водной среды, с – вынос из экосистемы

Средняя плотность личинок IV возраста в среднем по озеру составляет 1187 экз/м², их биомасса 55,552 г/м² (Клишко, 1998). Валовая численность составляет 9496 · 10⁶ экз. с площади озера, исключая изобаты 3,0 м. Валовая биомасса достигает 888,832 т сырой массы, или 80 т сухого вещества. В оз. Кенон *Ch. plumosus* имеет 2 генерации. Личинки его популяции накапливают 1,877 т химических элементов. Допуская, что 90 % личинок IV возраста окукливается, то численность куколок может составить 6647 · 10⁶ экз. В экзувиях куколок общей массой 3,175 т сухого вещества концентрируется 72,01 кг химических элементов, которые удаляются из экосистемы водоема. При допущении 50 %-ного вылета имаго их численность составит 3323,6 · 10⁶ экз. сырой массы 22,767 т, или 5,99 т сухой массы. Вылетая из водоема, имаго могут вынести в своем теле 63,62 кг химических элементов. В период лета имаго их интенсивно поедают птицы, а такое же количество куколок, поднимающихся к поверхности воды, где из них вылетают взрослые комары, поедается рыбами. 63,62 кг металлов остается в водоеме в экзувиях личинок, которые захораниваются в донных отложениях.

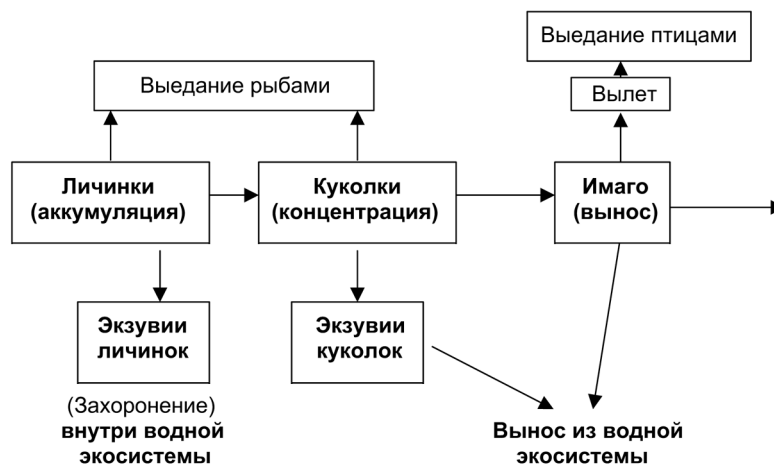


Рис. 3. Схема миграции ионов металлов через популяцию хирономид *Chironomus plumosus*

По сравнению с величиной сбросов в результате эксплуатационной деятельности ТЭЦ это ничтожно малая величина. Тем не менее определенный вклад в самоочищение техногенного водоема вносят именно гидробионты из числа амфибиотических насекомых, удаляя химические элементы, в том числе тяжелые металлы, накапливающиеся в их теле. Среди них хирономиды – доминирующая группа, поэтому их вклад наиболее существенный.

Литература

- Брень Н.В., Домашлинец В.Г. Беспозвоночные как мониторы полиметаллического загрязнения донных отложений // Гидробиол. ж., 1998. Т. 34, № 5. С. 80–93
- Киричук Г.Е. Особенности накопления тяжелых металлов в организме двустворчатых моллюсков // Гидробиол. ж., 2003. Т. 39, № 3. С. 45–55
- Клишко О.К. Зообентос // Экология городского водоема. Новосибирск: СО РАН, 1998. С. 145–170
- Клишко О.К., Бердников Н.В., Авдеев Д.В., Зазулина В.Е., Глушенкова О.В. Роль двустворчатых моллюсков в процессах биогенной миграции, аккумуляции и минерализации химических элементов в природно-техногенных водоемах // Докл. III Междун. науч.-практ. конф. «Тяжелые металлы, радионуклиды и элементы-биофилы в окружающей среде». Семипалатинск; Казахстан, 2004. С. 229–235.
- Курант В.З. Динамика белков и нуклеиновых кислот в организме карпа под влиянием повышенных концентраций Mn, Zn и Cu // Гидробиол. ж., 2001. Т.37, № 4. С. 67–72.
- Мур Дж.В., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах. М.: Мир, 1987. 288 с.
- Никаноров А.М., Жулидов А.В., Покаржевский А.Д. Биомониторинг тяжелых металлов в пресноводных экосистемах. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 144 с.
- Тодераш И.К. Общие основы оценки функционального значения популяций водных животных в экосистемах континентальных водоемов. Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Л., 1991. 41 с.
- Яковлев В.А. Влияние закисленных вод на концентрации Ca и Mg в личинках ручейников // Водные ресурсы, 2003. Т. 30, № 4. С. 461–465