

УДК 595.3: 574.64.08

В. А. Гремячих, И. И. Томилина

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАКОПЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ  
РТУТИ ПЛАНКТОННЫМИ РАКООБРАЗНЫМИ  
*CERIODAPHNIA AFFINIS***

В экспериментальных исследованиях на представителях планктонных ракообразных *Ceriodaphnia affinis* установлены основные закономерности накопления ими различных соединений ртути, содержащихся в сублетальных концентрациях в среде или поступающих с кормом. Выявлены особенности воздействия сублетальных концентраций ртути на животных, в зависимости от пути ее поступления в организм.

**Ключевые слова:** гидробионты, ртуть, накопление и токсичность.

Ртуть и ее соединения относятся к числу наиболее опасных для живых организмов токсических веществ. В отличие от других тяжелых металлов, ртуть обнаруживается повсеместно, что связано с ее уникальными физико-химическими свойствами (летучестью, длительным пребыванием в атмосфере, образованием ртутьорганических соединений, растворимых в воде и липидах) и возможностью атмосферного переноса и осаждения на значительных расстояниях от источников [13].

В отсутствие локальных источников загрязнения ртуть и ее соединения поступают в водоемы главным образом из атмосферы, донных отложений и с поверхностным стоком [23]. Под воздействием совокупности микробиологических, физических и химических факторов они трансформируются в токсичные метилированные соединения, которые интенсивнее, чем неорганические, аккумулируются гидробионтами и медленнее выводятся из организма. Это приводит к более эффективному, по сравнению с прямым поглощением металла животными из воды или донных отложений, переносу ртути по водной трофической цепи [17].

Экспериментальные работы по изучению влияния соединений ртути на гидробионтов проводились в основном на рыбах с использованием неорганических соединений металла в концентрациях, ориентированных на оценку последствий техногенных выбросов [20]. Исследований подобного рода на водных беспозвоночных разных трофических уровней мало, несмотря на то, что они играют существенную роль в аккумуляции металла в водных экосистемах (в том числе поступающего из рыбы как вторичного источника ртутного загрязнения) и эффективной его передаче по пищевой цепи.

© Гремячих В. А., Томилина И. И., 2010

Цель работы — выявление основных закономерностей накопления представителем планктонных ракообразных *Ceriodaphnia affinis* органических и неорганических соединений ртути, поступающих в организм животных с пищей или из воды, и его биологические последствия.

**Материал и методика исследований.** Экспериментальные лабораторные исследования проводили на ветвистоусом рачке *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg. В качестве источника неорганических соединений металла использовали водный раствор хлорида ртути, вносимый непосредственно в среду обитания животных или ассоциированный (адсорбированный или аккумулятивный) с кормом — зелеными водорослями р. *Chlorella*. Источником ртутьорганических соединений для животных служил фарш, приготовленный из мышечной ткани рыб (окуня и плотвы) Рыбинского водохранилища — поскольку 90—99% ртути в мышцах рыб находится в метилированной форме. Содержание металла в мышцах окуня массой 400 г и выше составляло 0,40 (0,30—0,50), плотвы массой 200—400 г — 0,025 (0,02—0,03) мг/кг сырой массы. В экспериментах использовали отстоянную артезианскую воду с величиной рН 7,8—8,2, содержанием  $\text{Ca}^{2+}$  около 40 мг/л, кислорода 6,0—7,5 мг/л и температурой  $22 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Накопление ракообразными неорганических и органических соединений ртути, содержащихся в среде и корме, и связанные с ним биологические эффекты изучали в ряду 18—20 поколений цериодафний. Интенсивность аккумуляции  $\text{Hg}^{2+}$  рачками оценивали по коэффициенту биологического накопления ( $K_{\text{н}}$ ), под которым понимают отношение содержания металла в теле животных к его содержанию в источнике (воде, корме) в расчете на единицу массы вещества.

В первые сутки после рождения рачков помещали в отдельные стаканчики с 15 см<sup>3</sup> отстоянной воды и наблюдали при заданных экспериментальных условиях либо в течение двух недель, либо на протяжении всего жизненного цикла. Каждая экспериментальная группа (включая контроль) состояла из 20—30 животных. Потомство от третьего помета служило исходным материалом для следующего по порядку поколения цериодафний. Животных контрольных групп ежедневно кормили, внося 0,2 см<sup>3</sup> водорослевой суспензии хлореллы (плотность клеток в концентрированной суспензии —  $\sim 3,0 \times 10^7$  кл/см<sup>3</sup>, в культивационной среде сразу после кормления —  $\sim 2,0 \times 10^5$  кл/см<sup>3</sup>) [4]. Содержание ртути в ней было ниже порога аналитического определения.

В первом эксперименте ртутьорганические соединения содержались в корме. Животных наблюдали в течение двух недель от рождения в ряду 18 поколений. Для приготовления ртутьсодержащего корма фрагмент мышечной ткани рыб растирали в ступке и разводили водой. После отстаивания верхний слой гомогената вносили в культивационную воду в объеме, определенном для водорослевой суспензии [4]. Кормление цериодафний фаршем проводили в первые сутки от их рождения. В каждый стаканчик поступило порядка  $0,25 \cdot 10^{-3}$  и  $3,5 \cdot 10^{-3}$  мкг ртути при кормлении фаршем из плотвы и окуня, соответственно. Затем рачков переводили на питание хлореллой, как в контроле.

Во втором эксперименте хлорид ртути присутствовал непосредственно в среде. Предварительно была установлена 48-часовая  $LC_{50}$  раствора хлорида ртути для цериодафний — 10 мкг/л. Животных содержали в сублетальных концентрациях раствора хлорида ртути — 0,2 и 1,0 мкг/л: в I, V, X и XX поколениях — на протяжении всего жизненного цикла (около шести недель), во всех остальных — две недели, начиная с первых суток от момента рождения (растворы обновляли ежедневно).

В третьем эксперименте хлорид ртути был ассоциирован с кормом. Схема эксперимента аналогична предыдущей, за исключением того, что животные содержались в чистой воде (также обновляемой еженедельно), а ртуть поступала с кормом. Для приготовления ртутьсодержащей хлореллы за сутки до отделения водорослей в культивационную среду добавляли хлорид ртути в концентрации 0,05 мг/л. После центрифугирования в суспензии водорослей определяли содержание ассоциированной с ней ртути и разбавляли дистиллированной водой до необходимой плотности клеток. По подсчетам, ежедневно в среду обитания цериодафний с кормом поступало 0,01 мкг  $Hg^{2+}$ .

Во всех экспериментах регистрировали выживаемость и индивидуальную плодовитость (средние за первую неделю жизни), размеры животных (к XVIII—XX поколениям). Во втором и третьем — продолжительность жизненного цикла и индивидуальную плодовитость за весь жизненный цикл (в I, V, X и XX поколениях), устойчивость к действию неорганической ртути (48-часовая  $LC_{50}$ ) и накопление рачками ртути (к XX поколению). В связи со значительной естественной вариабельностью плодовитости у цериодафний полученные в экспериментах результаты анализировали не по отдельным поколениям животных, а по группам. Количество животных в экспериментах составило соответственно ~1000, 1800 и 1200 особей (без учета данного ими потомства).

Общее содержание ртути в корме и интегральных пробах животных, высушенных до постоянной массы, определяли методом атомной абсорбции холодного пара с использованием резонансной линии 253,7 нм [6] на анализаторе ртути Юлия-5К после растворения биологического материала в смеси  $HNO_3$  и  $H_2O_2$  [18]. Навески составляли от 0,5 до 1,5 г.

Результаты обрабатывали статистически и представляли в виде средних значений и их ошибок ( $x \pm mx$ ). Достоверность различий оценивали, используя метод дисперсионного анализа (ANOVA, LSD — тест) при уровне значимости  $p < 0,05$ . Регрессионный анализ результатов проводили с помощью пакета программ STATGRAPHICS Plus 2.1 [21].

### *Результаты исследований и их обсуждение*

В первом (источник Hg — ртутьорганические соединения, содержащиеся в рыбном фарше) и втором (источник Hg —  $HgCl_2$  в растворе различной концентрации) экспериментах отмечено достоверное снижение выживаемости цериодафний I—VI поколений в первую неделю жизни в группах животных, получавших корм с максимальным содержанием ртутьорганических соединений и содержавшихся в растворе с максимальной концентра-

## 1. Показатели функционального состояния цериодафний в 1-ю неделю жизни

Условия эксперимента (вид соединений и источник Hg)	n	Выживаемость, %		Плодовитость, экз, на 1 самку	
		F I—VI	F > VI	F I—VI	F > VI
Первый эксперимент					
Hg-органические соединения, содержащиеся в корме (0,3—0,5 мг Hg/кг сырой массы)	20	74,9 ± 6,8 <sup>a</sup>	97,5 ± 1,8 <sup>a</sup>	12,5 ± 1,1 <sup>a</sup>	19,0 ± 1,1 <sup>b</sup>
Hg-органические соединения, содержащиеся в корме (0,02—0,04 мг Hg/кг сырой массы)	20	90,3 ± 5,8 <sup>b</sup>	99,2 ± 1,5 <sup>a</sup>	11,6 ± 0,8 <sup>a</sup>	17,0 ± 1,1 <sup>ab</sup>
Контроль	20	98,3 ± 1,7 <sup>b</sup>	98,9 ± 1,3 <sup>a</sup>	13,5 ± 0,7 <sup>a</sup>	14,7 ± 0,8 <sup>a</sup>
Второй эксперимент					
Раствор HgCl <sub>2</sub> (1,0 мкг/л)	30	82,9 ± 4,7 <sup>a</sup>	98,3 ± 1,7 <sup>a</sup>	6,6 ± 0,4 <sup>b</sup>	6,5 ± 0,7 <sup>a</sup>
Раствор HgCl <sub>2</sub> (0,2 мкг/л)	30	89,0 ± 4,0 <sup>ab</sup>	98,3 ± 1,7 <sup>a</sup>	6,8 ± 0,4 <sup>b</sup>	4,0 ± 0,4 <sup>a</sup>
Контроль	30	95,6 ± 2,0 <sup>b</sup>	95,0 ± 3,4 <sup>a</sup>	5,4 ± 0,3 <sup>a</sup>	4,9 ± 0,6 <sup>a</sup>
Третий эксперимент					
HgCl <sub>2</sub> , ассоциированный с кормом	30	92,2 ± 3,3 <sup>a</sup>	86,7 ± 4,9 <sup>a</sup>	13,4 ± 0,6 <sup>b</sup>	4,2 ± 0,4 <sup>a</sup>
Контроль	30	90,4 ± 2,5 <sup>a</sup>	98,3 ± 1,6 <sup>b</sup>	10,9 ± 0,6 <sup>a</sup>	3,6 ± 0,5 <sup>a</sup>

Примечание. Здесь и в табл. 2: приведено количество особей, исследованных в каждом поколении. Суммарное *n* для шести первых и всех последующих поколений составило в первом эксперименте соответственно 120 и 160, во втором и третьем — 180 и 60; *a*, *b* — значения с разными буквенными надстрочными индексами достоверно различаются при уровне значимости  $p < 0,05$  в каждом столбце по отдельным экспериментам.

цией хлорида ртути. В последующих поколениях показатель стабилизировался на уровне контрольного. В третьем эксперименте (источник Hg — HgCl<sub>2</sub>, ассоциированный с кормом) выживаемость цериодафний I—VI поколений в первую неделю жизни от контрольной не отличалась и достоверно снижалась в последующих поколениях (табл. 1).

Плодовитость цериодафний I—VI поколений в первую неделю жизни в первом эксперименте была на уровне соответствующего показателя для контрольной группы животных, во втором и третьем — достоверно его превышала. В последующих поколениях стимуляция плодовитости животных соединениями ртути имела место только в условиях первого эксперимента (см. табл. 1). Раствор HgCl<sub>2</sub> снижал выживаемость животных в первую неде-

## 2. Показатели функционального состояния периодафний в течение всего жизненного цикла

Условия эксперимента (вид соединений и источник Hg)	n	Суммарная плодовитость (за весь жизненный цикл), экз, на 1 самку		Продолжительность жизненного цикла, сут.	
		F I—VI	F > VI	F I—VI	F > VI
Второй эксперимент					
Раствор HgCl <sub>2</sub> (1,0 мкг/л)	30	72,2 ± 10,6 <sup>a</sup>	103,7 ± 13,7 <sup>b</sup>	26,1 ± 2,9 <sup>a</sup>	29,9 ± 2,2 <sup>ab</sup>
Раствор HgCl <sub>2</sub> (0,2 мкг/л)	30	115,0 ± 11,4 <sup>b</sup>	66,2 ± 8,3 <sup>a</sup>	34,8 ± 2,9 <sup>b</sup>	24,3 ± 2,0 <sup>a</sup>
Контроль	30	115,0 ± 9,7 <sup>b</sup>	91,4 ± 8,0 <sup>ab</sup>	38,3 ± 2,8 <sup>b</sup>	31,2 ± 2,1 <sup>b</sup>
Третий эксперимент					
HgCl <sub>2</sub> , ассоциированный с кормом	30	139,2 ± 8,1 <sup>b</sup>	106,4 ± 11,7 <sup>a</sup>	38,6 ± 1,9 <sup>b</sup>	36,2 ± 2,7 <sup>a</sup>
Контроль	30	86,4 ± 8,2 <sup>a</sup>	123,6 ± 9,1 <sup>a</sup>	29,5 ± 2,2 <sup>a</sup>	44,1 ± 2,6 <sup>b</sup>

лю жизни, продолжительность жизненного цикла и, вероятно за счет этого, суммарную плодовитость при 1,0 мкг Hg/л (табл. 2). Хлорид ртути, ассоциированный с кормом, в меньшей степени влиял на выживаемость и продолжительность жизненного цикла рачков, но достоверно стимулировал плодовитость.

Планктонным организмам отводится центральная роль в распространении токсических веществ в водных экосистемах. Анализ последствий поступления химических веществ, в том числе тяжелых металлов, в пресные воды и аккумуляции их гидробионтами предполагает рассмотрение разнообразных аспектов загрязнения вод (химических, экологических, технологических, медико-гигиенических и др.), а также исследование закономерностей и механизмов их действия в условиях водной среды [2].

Основная часть экспериментальных работ в этом направлении выполнена с использованием соединений кадмия, марганца, меди, никеля, олова, хрома и цинка на самом распространенном тест-объекте — *Daphnia magna* [5, 10, 12]. Тяжелые металлы токсичны для *D. magna* при уровне концентраций  $10^{-1}$ — $10^{-3}$  мг/л и в порядке убывающей силы токсического действия располагаются в следующий ряд: серебро — кадмий — ртуть — медь — цинк — никель — хром — марганец — олово — железо [2].

В комплексе изменений, происходящих в организме при воздействии загрязняющих веществ, сочетаются как деструктивные процессы, представляющие собственно механизм токсического поражения, так и адаптивные реакции, направленные на ослабление или компенсацию этого поражения. Гибель, сокращение плодовитости, появление морфологических аномалий, не совместимых с жизнью, отражают преобладание «пассивного реагирова-

ния» организмов на токсическое воздействие; ускорение роста, повышение выживаемости и выход жизнеспособного потомства — «активного» [11]. Итогом преобладания тех или иных тенденций оказывается разная степень вероятности выживания индивидуума или популяции. Под воздействием тяжелых металлов (в частности,  $Cr$  и  $Cu$ ) у представителей пресноводного планктона происходит сокращение продолжительности жизни с нарастающим токсическим эффектом в ряду поколений, угнетение или стимуляция плодовитости, часто сопровождающаяся снижением качества потомства и наличием патологических отклонений (абортивные яйца, мертворожденное потомство), изменение размеров животных [11].

Работы, посвященные изучению влияния ртути на водных беспозвоночных, немногочисленны и в большинстве своем выполнены с использованием растворов неорганических соединений металла. Однако ртутьорганические соединения, содержащиеся в пище (организмы низших трофических уровней), гораздо опаснее с точки зрения биологических последствий для гидробионтов, которые населяют подверженные атмосферному ртутному загрязнению континентальные водоемы.

Известно, что в сублетальных концентрациях соединения ртути влияют в первую очередь на воспроизводство водных беспозвоночных, угнетают рост и процессы регенерации поврежденных тканей, вызывают неспецифические поведенческие и морфофункциональные нарушения, снижая тем самым жизнеспособность организмов. Отмечено повышение устойчивости к токсическому действию ртути у планктонных ракообразных, подвергшихся действию металла в течение короткого промежутка времени, которое сохраняется в последующих поколениях животных [22].

Сравнительный анализ токсического действия растворов неорганических и органических соединений ртути показал, что 21-дневная экспозиция *D. magna* в растворах хлорида ртути приводит к достоверному снижению выживаемости и плодовитости (по группам из 20 животных) только при концентрации 2,7 мкг/л, в то время как 0,36, 0,72 и 1,28 мкг/л подобного действия не оказывают [14]. В растворах хлорида метил ртути (0,04, 0,07, 0,13 и 0,26 мкг/л) статистически значимое снижение плодовитости рачков отмечено уже при 0,04 мкг/л, а выживаемость ни в одной исследованной концентрации токсического вещества от контрольных значений не отличалась.

Источником ртутьорганических соединений для *C. affinis* в наших исследованиях служил рыбный фарш, непродолжительный контакт с которым в ряду поколений животных приводил к стимуляции их плодовитости. Возможно, положительный эффект в данном случае был связан с очень низкими дозами аккумулированной цериодафниями метил ртути (измерений содержания ртути у рачков не проводили). Хлорид ртути в экспериментах присутствовал не только в воде (в концентрациях близких указанным выше), но был также ассоциирован с кормом, а показатели выживаемости и плодовитости исследовали в поколениях животных на индивидуальном уровне. Полученные результаты в основном согласуются с приведенными выше: раствор хлорида ртути в диапазоне концентраций 0,4—3,0 мкг/л (в нашем случае 0,2 и 1,0 мкг/л) влиял на выживаемость и плодовитость рачков, и степень этого влияния зависела от дозы  $HgCl_2$ .

### 3. Динамика исследованных показателей под воздействием хлорида ртути в поколениях цеериодафний

Показатели	Раствор HgCl <sub>2</sub>				Ассоциированный с кормом HgCl <sub>2</sub>	
	0,2, мкг/л		1,0, мкг/л		I—V	X—XX
	I—V	X—XX	I—V	X—XX		
Выживаемость в 1-ю неделю	Ниже <i>N</i>	<i>N</i>	Ниже <i>N</i> *	<i>N</i>	<i>N</i>	Ниже <i>N</i> *
Плодовитость в 1-ю неделю	Выше <i>N</i> *	<i>N</i>	Выше <i>N</i> *	<i>N</i>	Выше <i>N</i> *	<i>N</i>
Продолжительность жизненного цикла	<i>N</i>	Ниже <i>N</i> *	Ниже <i>N</i> *	<i>N</i>	Выше <i>N</i> *	Ниже <i>N</i> *
Суммарная плодовитость	<i>N</i>	<i>N</i>	Ниже <i>N</i> *	<i>N</i>	Выше <i>N</i> *	<i>N</i>

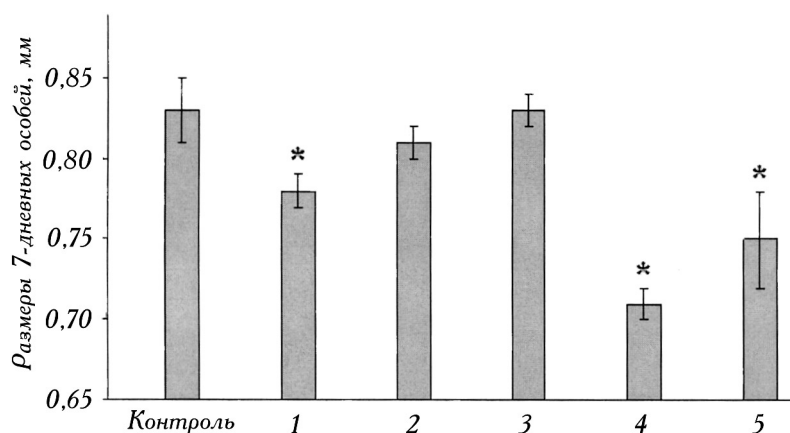
Примечание. *N* — значение соответствующего показателя достоверно от контрольного не отличается; \* достоверность отличий от контрольных значений при  $p < 0,05$ .

У животных, получавших ртутьорганические соединения и тот же HgCl<sub>2</sub> с кормом, была выявлена стимуляция плодовитости, сохранявшаяся на протяжении длительного времени (в течение 5 поколений). Как известно, стимулирующее влияние потенциально токсичного вещества обеспечивается за счет мобилизации резервных ресурсов организма и сохраняется долго, если негативное влияние не превышает адаптивного ресурса [11]. Анализ динамики исследованных показателей в поколениях животных представлен в таблице 3.

Токсическое влияние растворов хлорида ртути на цеериодафний в I—V поколениях выражено сильнее (и пропорционально дозе), чем влияние того же соединения металла, ассоциированного с кормом. В последнем случае отмечена стабильная стимуляция плодовитости рачков, не сопровождавшаяся снижением качества потомства: не было абортивных яиц, мертворожденных цеериодафний, размеры оставались в пределах нормы.

К X—XX поколениям у животных, содержащихся в растворах хлорида ртути, первоначальное преобладание деструктивных процессов сменяется адаптивно-компенсаторными, направленными на ослабление или компенсацию действия токсического вещества. А длительная стимуляция плодовитости животных, получавших в пищу корм с хлоридом ртути, сопровождается снижением показателей выживаемости в первую неделю жизни и продолжительности всего жизненного цикла (вероятнее всего, с целью сохранения способности активно размножаться), а также достоверным уменьшением размеров животных.

Интерпретировать процессы, протекающие в поколениях животных под воздействием сублетальных концентраций хлорида ртути в растворах различной концентрации и ассоциированного с кормом, можно по-разному. Рассчитанная действующая концентрация хлорида ртути, ассоциированно-



Размеры 7-дневных цериодафний в XVIII—XX поколениях в экспериментах: с кормом, содержащим ртутьорганические соединения (1 — 0,025 и 2 — 0,4 мг/кг сырой массы), с раствором HgCl<sub>2</sub> (3 — 0,2 и 4 — 1,0 мкг/л) и с HgCl<sub>2</sub>, ассоциированным с кормом (5 — хлорелла + Hg); \* достоверность отличий от контрольных значений при  $p < 0,05$ .

го с кормом, близка к минимальной в растворе. Концентрации соединений ртути во всех экспериментах были невысоки и не сильно различались между собой, хотя накопление металла цериодафниями из раствора происходило менее интенсивно, чем из корма, но до уровней одного порядка. Хлорид ртути в корме вызывал стимуляцию плодовитости цериодафний в поколениях, в отличие от выраженного токсического эффекта растворов хлорида ртути в обеих концентрациях. Токсичность одной и той же формы ртути, вероятно, зависит от пути поступления соединений металла в организм, так же как и эффективность накопления Hg животными. Водные организмы, в отличие от наземных, в большей степени зависимы от факторов внешней среды и особо чувствительны к изменению химического состава воды [8].

Размеры 7-дневных цериодафний измеряли в XVIII поколении первого эксперимента и в XX — второго и третьего. Достоверно более мелкие особи по сравнению с контрольными ( $0,83 \pm 0,02$ ) были отмечены в группах животных, получавших корм с относительно низким содержанием метил ртути ( $0,78 \pm 0,01$ ) и с хлоридом ртути ( $0,75 \pm 0,01$ ), а также находившихся в растворе хлорида ртути самой высокой концентрации ( $0,71 \pm 0,01$  мм) (рисунок).

В группах животных, получавших в качестве корма рыбный фарш с низким содержанием ртутьорганических соединений (первый эксперимент) и хлорид ртути, ассоциированный с водорослями (третий эксперимент), а также в поколениях рачков, содержащихся в растворе хлорида ртути высокой концентрации (второй эксперимент) отмечено статистически значимое угнетение роста животных. В первых двух случаях уменьшение размеров рачков могло происходить в связи с повышенными энергетическими затратами организма на поддержание плодовитости на «контрольном» уровне. В последнем случае задержка роста происходила, вероятно, под влиянием «высокой» дозы хлорида ртути в растворе.



4. Накопление ртути *C. affinis* (в XX поколении)

Условия эксперимента (источник Hg)	Концентрация Hg в источнике	Содержание Hg в цериодафниях, мкг/г сухой массы	$K_H$
Раствор HgCl <sub>2</sub>	0,2 мкг/л	2,8 ± 0,02	1,0×10 <sup>3</sup>
	1,0 мкг/л	3,7 ± 0,01	0,4×10 <sup>3</sup>
HgCl <sub>2</sub> , ассоциированный с кормом	0,4 мкг/л*	7,2 ± 0,04	2,0×10 <sup>3</sup>

Примечание. Концентрация HgCl<sub>2</sub>, ассоциированного с кормом, приводится из того расчета, что ежедневно в среду поступал 0,01 мкг ртути, а продолжительность жизни цериодафний данной экспериментальной группы в XX поколении составила в среднем 36 сут.

Накопление ртути цериодафниями в интегральных пробах животных определяли в I поколении третьего и XX поколении второго и третьего экспериментов. Содержание металла в экспериментальных группах рачков XX поколения было выше контрольного (0,7 мг/кг сухой массы) и зависело от концентрации ртути в среде. Коэффициент накопления ртути цериодафниями приведен в таблице 4. С увеличением концентрации HgCl<sub>2</sub> в растворе во втором эксперименте  $K_H$  снижался. Ассоциированная с кормом ртуть в условиях третьего эксперимента аккумулировалась животными интенсивнее, чем из раствора хлорида ртути (при сопоставимых концентрациях металла). Содержание ртути в пробах цериодафний I и XX поколений третьего эксперимента составило соответственно 5 и 7 мг/кг сухой массы.

Аккумулирующая способность гидробионтов обусловлена многообразием экологических и физиологических факторов. Повышение концентрации металла в теле гидробионта или в его отдельных органах не свидетельствует однозначно о токсическом воздействии его на организм. Высокий уровень биологической аккумуляции металла может отражать способности организма депонировать те или иные микроэлементы при нормальном физиологическом состоянии [1]. Темпы накопления ртути гидробионтами в первую очередь зависят от формы соединений металла, их концентрации в окружающей среде и пути поступления в организм животных (алиментарный или непосредственно из воды). Наиболее эффективно аккумулируются живыми организмами ртутьорганические соединения, содержащиеся в пище [16], в то время как накопление различных форм металла из воды в значительной степени зависит от совокупности гидрохимических характеристик [19] и не превышает 15% общего поступления ртути в организм [15]. Немаловажное значение имеют также видовая принадлежность организма, которая, в свою очередь, определяет его трофическое положение, а также сезон и стадия развития [7]. В экспериментальных работах показано, что гидробионты накапливают металл тем больше в абсолютных единицах, чем выше его содержание в среде [3, 14], то есть относятся к макроконцентраторам ртути ( $K_H > 1$ ) [9]. При этом интенсивность аккумуляции соединений ртути животными снижается с увеличением ее концентрации в воде.

Накопление различных форм соединений ртути из разных источников в экспериментах с планктонными ракообразными возрастало с увеличением концентрации Hg. Аккумуляция соединений металла, содержащихся в кор-

**5. Значения 48-часовой LC<sub>50</sub> раствора HgCl<sub>2</sub> для цериодафний**

Условия эксперимента (концентрация HgCl <sub>2</sub> и источник Hg)	48-часовая LC <sub>50</sub> , раствора HgCl <sub>2</sub> , мкг/л
Раствор HgCl <sub>2</sub> (0,2 мкг/л)	14,5 <sup>1</sup>
Раствор HgCl <sub>2</sub> (1,0 мкг/л)	13,2 <sup>1</sup>
HgCl <sub>2</sub> , ассоциированный с кормом	13,5 <sup>1</sup>
Контроль	10,0 <sup>2</sup>

Примечание. 1 — определяли для потомства цериодафний XX поколения; 2 — определяли для интактных цериодафний до начала экспериментов и для потомства интактных рачков XX поколения.

ме или ассоциированных с ним, происходила более интенсивно, чем из воды или грунта (см. табл. 4). Коэффициент накопления ртути гидробионтами снижался с увеличением ее содержания в источнике. Связано ли это с ограничениями, которые накладывает на аккумуляцию ртути животными продолжительность их жизненного цикла, или существуют на биохимическом уровне какие-то механизмы, препятствующие накоплению металла или обеспечивающие его выведение из организма, в настоящий момент не ясно.

Измерение содержания металла в опытной группе цериодафний, получавших хлорид ртути с кормом, проводили в I и XX поколениях. Полученные значения показателя в обоих случаях были довольно высоки (соответственно 5 и 7 мг/кг сухой массы), что свидетельствует о быстрых темпах накопления металла животными, и, возможно, о существовании некоторых механизмов ограничивающих этот процесс (например, короткий жизненный цикл), но не позволяет судить о передаче ртути от поколения к поколению.

Устойчивость цериодафний, на протяжении 20 поколений подвергавшихся действию соединений ртути, к раствору HgCl<sub>2</sub> возрасла (табл. 5).

В связи с невысокой концентрацией ртути большая часть рачков экспериментальных групп к X—XX поколениям справилась с токсической нагрузкой: функциональные показатели состояния животных вернулись в пределы нормы, устойчивость к действию HgCl<sub>2</sub> повысилась. Однако уменьшение размеров цериодафний позволяет предположить, что негативные эффекты при увеличении концентрации или длительности экспонирования рачков в присутствии соединений ртути окажутся более выраженными в силу недостаточности адаптивных возможностей животных.

**Заключение**

Накопление цериодафниями металла из растворов хлорида ртути сублетальных концентраций происходило менее интенсивно, чем соединений ртути, ассоциированных с кормом (хлорид ртути + хлорелла). Реакция ракообразных на воздействие токсического вещества имела разную степень выраженности и направленности, но в первую очередь затрагивала сферу воспроизводства животных и продолжительность жизненного цикла. Хлорид ртути, содержащийся в

воде, в I—V поколениях снижал выживаемость цериодафний в первую неделю жизни, продолжительность жизненного цикла и суммарную плодовитость. Хлорид ртути, ассоциированный с кормом, стимулировал плодовитость рачков, не снижая качества потомства. К X—XX поколениям у животных, содержащихся в растворах хлорида ртути, первоначальное преобладание деструктивных процессов сменялось адаптивно-компенсаторными: все исследованные показатели от контрольных значений не отличались. А длительная стимуляция плодовитости животных, получавших в пищу корм с хлоридом ртути, сопровождалась снижением показателей выживаемости в первую неделю жизни и продолжительности всего жизненного цикла, уменьшением размеров животных.

\*\*

*Під час експериментальних досліджень на представниках планктонних ракоподібних Ceriodaphnia affinis Lillijeborg встановлено основні закономірності накопичення ними різних сполук ртуті, які містяться в сублетальних концентраціях в середовищі або надходять з кормом. Виявлено особливості дії сублетальних концентрацій ртуті на тварин залежно від шляху її потрапляння в організм.*

\*\*

*Basic peculiarities of accumulation of different mercury compounds containing in sublethal environmental concentrations as well as income with food were studied in planktonic crustacean Ceriodaphnia affinis Lillijeborg. The specific effects of sublethal mercury concentrations on animals depending on mercury income inside organisms were observed.*

\*\*

1. Безель В.С., Ангрияшкин Ю.Г., Коршун М.Н. и др. К вопросу оценки последствий загрязнения водных экосистем промышленными выбросами ртути // Количественные методы в экологии позвоночных. — Свердловск: УрНЦ РАН, 1983. — С. 141—157.
2. Брагинский Л.П., Величко И.М., Щербань Э.П. Пресноводный планктон в токсической среде. — Киев: Наук. думка, 1987. — 180 с.
3. Гремячих В.А., Гребенюк Л.П., Комов В.Т. и др. Накопление ртути и ее тератогенное действие на личинок *Chironomus riparius* Meigen (Diptera: Chironomidae) // Биология внутр. вод. — 2006. — № 1. — С. 99—107.
4. Жмур Н.С. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости цериодафний. Ф.Р. 1.39.2001.00282. — М.: АКВАРОС, 2001. — 52 с.
5. Исакова Е.Ф., Коломенская Е.Е. Морфологические отклонения у *Daphnia magna* Straus при кратковременном воздействии бихромата калия // Экологические системы и приборы. — М., 2002. — С. 31—34.
6. Кузубова Л.И. Отбор и подготовка проб при определении ртути и ряда тяжелых металлов в природных объектах // Поведение ртути и других тяжелых металлов в экосистемах. — Новосибирск: Изд-во Гос. публ. науч.-тех. библиотеки СО АН СССР, 1989. — Ч. 1. — С. 6—42.
7. Мур Дж. В., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах. — М.: Мир, 1987. — 288 с.

8. Немова Н.Н., Высоцкая Р.У. Биохимическая индикация состояния рыб. — М.: Наука, 2004. — 215 с.
9. Никаноров А.М., Жулигов А.В. Биомониторинг металлов в пресноводных экосистемах. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 312 с.
10. Оловоорганические соединения и жизненные процессы гидробионтов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975. — 261 с.
11. Филенко О.Ф., Дмитриева А.Г., Исакова Е.Ф. и др. Механизмы реагирования водных организмов на воздействие токсических веществ // Антропогенные влияния на водные экосистемы. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. — С. 70—93.
12. Щербань Э.П. Токсичность ионов некоторых тяжелых металлов для *D. magna* в зависимости от температуры // Гидробиол. журн. — 1977. — Т. 13, № 14. — С. 86—91.
13. Arctic Pollution (AMAP). — Oslo, 2002. — 212 p.
14. Biesinger K.E., Anderson L.E., Eaton J.G. Chronic effects of inorganic and organic mercury on *Dahhnia magna*: toxicity, accumulation and loss // Arch. Environ. Contam. — 1982. — N 11. — P. 769—774.
15. Hall B.D., Bodaly R.A., Fudge R.J.P. et al. Food as the dominant pathway of methylmercury uptake by fish // Water, Air and Soil Pollut. — 1997. — Vol. 100. — P. 13—24.
16. Harris R.C., Snodgrass W.J. Bioenergetic simulations of mercury uptake and retention in walleye (*Stizostedion vitreum*) and yellow perch (*Perca flavescens*) // Water. Pollut. Res. J. Canada. — 1993. — Vol. 28, N 1. — P. 217—236.
17. Huckabee J.W., Elwood J.W., Hildebrand S.G. Accumulation of mercury in freshwater biota // The biogeochemistry of mercury in the environment. — Amsterdam: Elsevier/North-Holland Biomedical Press, 1979. — P. 277—302.
18. Manual of methods in aquatic environmental research. P. 9: Analyses of metals and organochlorines in fish // Rome. FAO Fish. Tech. Paper. — 1983. — N 212. — 33 p.
19. Monson B.A., Brezonik P. Influence of food, aquatic humus and alkalinity on methylmercury uptake by *Daphnia magna* // Environ. Toxicol. and Chem. — 1999. — Vol. 18, N 3. — P. 560—566.
20. Scheuhammer A.M., Meyer M.W., Sandheinrich M.B. Effects of environmental methylmercury of the health of wild birds, mammals and fish // AMBIO. — 2007. — Vol. 36, N 1. — P. 12—18.
21. Sokal R. R., Rohlf F. J. Biometry. The principals and practice of statistics in biological research. — New York: W. H. Freeman and Co, 1995. — 887 p.
22. Tsui M.T.K., Wang W.X. Influences of maternal exposure on the tolerance and physiological performance of *Daphnia magna* under mercury // Environ. Toxicol. and Chem. — 2005. — N 5. — P. 1228—1234.
23. Watras C.J., Morrison K.A., Back R.C. Mass balance studies of mercury and methyl mercury in small temperate/boreal lakes of the northern hemisphere // Global and regional mercury cycles: sources, fluxes and mass balances. — Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1996. — P. 329—358.