

СОДЕРЖАНИЕ РТУТИ В ВОДНЫХ ЖУКАХ (Coleoptera: Dytiscidae, Hydrophilidae) РАЗНЫХ РАЗМЕРНЫХ КЛАССОВ

© 2020 г. Ю. Г. Удоденко^{a, b, *}, А. А. Прокин^{a, b}, Д. Г. Селезнев^a, А. С. Сажнев^a, Е. С. Иванова^b

^aИнститут биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук,
пос. Борок, Некоузский р-н, Ярославская обл., Россия

^bЧереповецкий государственный университет, Череповец, Россия

*e-mail: udu@ibiw.ru

Поступила в редакцию 20.12.2019 г.

После доработки 27.02.2020 г.

Принята к публикации 13.03.2020 г.

Определено содержание ртути в имаго водных жуков, обитающих в бобровых прудах Полистово-Ловатской системы верховых болот (Новгородская обл.). Исследована 201 особь из девяти видов сем. Dytiscidae и одного вида сем. Hydrophilidae, относящихся к II и III размерным классам. Установлено, что в жуках II размерного класса содержание ртути достоверно различается между видами ($\chi^2 = 32.93$, $p < 0.01$). Максимальные концентрации выявлены у *Graphoderus cinereus* (0.259 ± 0.091 мкг/г сухой массы), минимальные — у *Hydrochara caraboides* (0.091 ± 0.020 мкг/г сухой массы). Для жуков III размерного класса (более крупных) достоверных различий в содержании ртути между видами не обнаружено. У жуков II размерного класса с увеличением массы тела уменьшается концентрация ртути в организме (ранговый коэффициент Кендалла $\tau = -0.31$, $p < 0.01$). Содержание ртути в отделах тела жуков рода *Dytiscus* увеличивается в ряду: надкрылья и крылья—ноги—голова и грудь—брюшко.

Ключевые слова: ртуть, бобровые пруды, водные жуки, Полистово-Ловатская система верховых болот, Рдейский заповедник

DOI: 10.31857/S0320965220050149

ВВЕДЕНИЕ

Ртуть — повсеместно распространенный токсичный элемент, поступающий в окружающую среду из естественных (извержения вулканов, дегазация с поверхности Мирового океана) и антропогенных (добыча золота, черная и цветная металлургия, сжигание ископаемого топлива и т.д.) источников (Driscoll et al., 2013; UN..., 2019). Накопление ртути зависит от трофического статуса и типа диеты (Wiener et al., 2002). Содержание ее в организме животных увеличивается с ростом их положения в трофической сети — максимальные значения отмечаются у хищных видов (Комов и др., 2017; Lobus, Komov, 2016). Наибольшие концентрации ртути среди гидробионтов пресных водоемов в умеренных широтах зарегистрированы у хищных видов рыб, занимающих наиболее высокие уровни в локальной трофической сети (Buck et al., 2019). Накопление соединений ртути в органах и тканях животных, в том числе человека, приводит к развитию негативных биологических эффектов — изменению нормального гормонального фона и нарушению функционирования нервной, сердечно-сосудистой и репродуктивной систем (Немова, 2004; Scheuhammer et al., 2015).

Водные экосистемы играют одну из ключевых ролей в биогеохимическом цикле ртути, поступающей сюда в результате прямого осаждения из атмосферы и миграции с латеральным стоком из автономных геохимических ландшафтов (Selin, 2009). В водоемах

под воздействием микроорганизмов ртуть переходит в биодоступную форму и вовлекается в пищевые цепи (Haynes et al., 2017). С увеличением заболоченности территории водосборного бассейна водоема возрастают уровни содержания ртути в мышцах обитающих в нем рыб (Greenfield et al., 2001).

Полистово-Ловатская болотная система, расположенная на северо-западе Российской Федерации, считается одним из наиболее крупных массивов верховых болот в Европе. Ее водные экосистемы значительно модифицированы в результате жизнедеятельности обыкновенного бобра (*Castor fiber* L., 1758) (Завьялов, 2015). Благодаря бобровым плотинам стабилизируется уровень воды, и накапливаются органические осадки, вовлекаемые в трофические сети (Collen, Gibson, 2000). В засуху пруды, созданные бобром, выступают в роли рефугиумов для водных обитателей, в том числе водных жесткокрылых (Сажнев, Завьялов, 2018). В бобровых прудах могут ускоряться процессы метелирования ртути, что способствует ее поступлению в локальную пищевую сеть (Roy et al., 2009). Многие бобровые пруды в пределах Полистово-Ловатской системы безрыбны, тогда позицию верховных хищников в структуре локальных пищевых сетей могут занимать хищные водные жесткокрылые (Arnot et al., 2006).

К настоящему времени исследовано содержание ртути в органах и тканях окуня (*Perca fluviatilis* L., 1758) — наиболее массового вида рыб в озерах Полистово-Ловатской системы болот (Камшилова и др.,

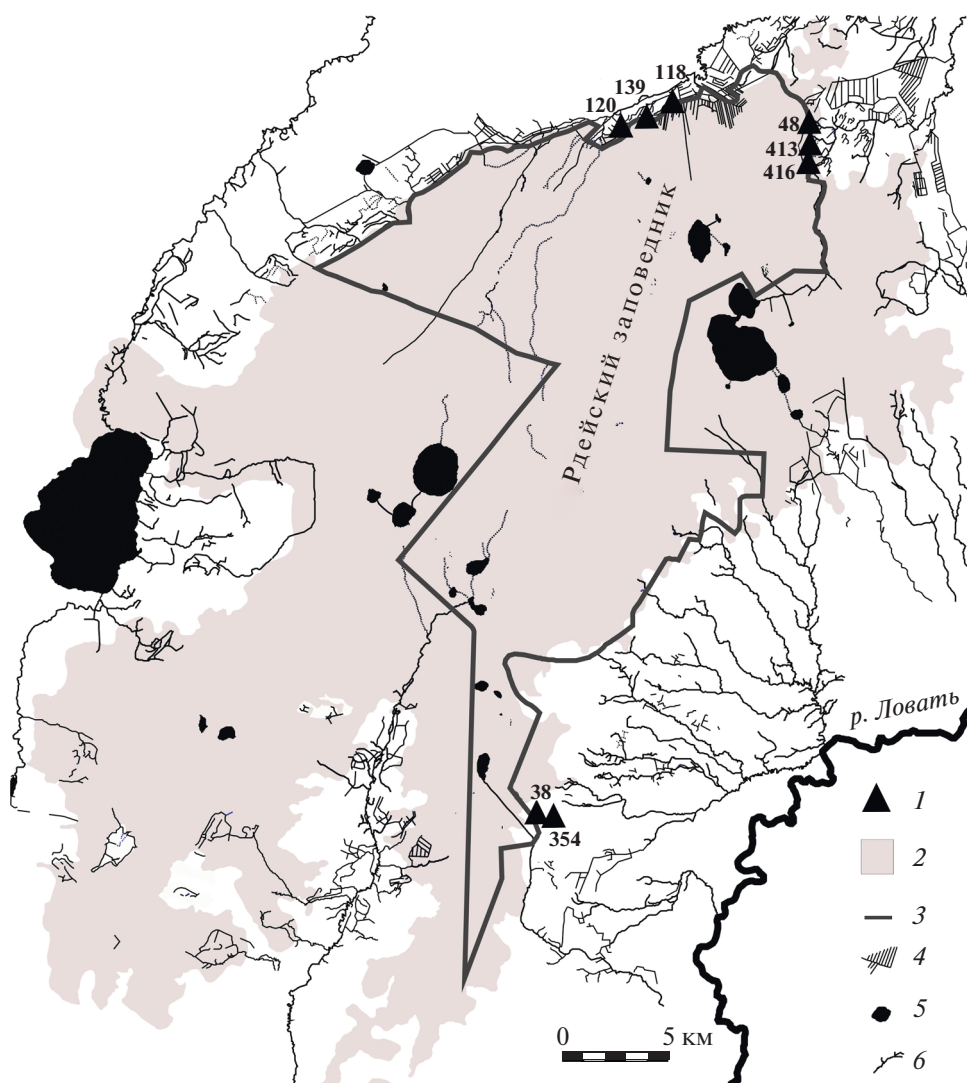


Рис. 1. Места сбора проб в бобровых поселениях на территории Рдейского заповедника и его охранной зоны. 1 – обследованные бобровые поселения (пронумерованы), 2 – Полистово-Ловатская болотная система, 3 – границы заповедника, 4 – мелиоративные каналы, 5 – озера, 6 – реки и ручьи.

2013). Однако остаются неизвестными уровни накопления ртути водными жуками, занимающими в безрыбных бобровых прудах верхние уровни в локальных пищевых сетях.

Цель работы – изучить особенности накопления ртути у водных жуков, обитающих в безрыбных бобровых прудах в пределах Полистово-Ловатской системы верховых болот.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом послужили сборы водных жесткокрылых в бобровых прудах, расположенных в пределах охранной зоны и на территории заповедника “Рдейский” (Новгородская обл.), занимающего восточную часть Полистово-Ловатской болотной системы (рис. 1).

В весенне-раннелетний период 2016 г. (с 27 апреля по 2 мая и с 6 по 14 июня) обследовано восемь поселений обыкновенного бобра (в мелиоративных каналах и мелиорированных малых реках). Эти временные рамки сопоставимы с периодами активности жуков имагинальной стадии, по которой можно точно идентифицировать виды большинства водных жесткокрылых. Для обозначения прудов использована нумерация, принятая в работе Сажнева, Завьялова (2018).

Бобровые пруды № 48, 413 и 416 относятся к бассейну малой р. Редья, они образованы на мелиоративных каналах, выходящих из болота. Пруды № 118, 120 и 139 относятся к системе р. Порусья, среди них пруд № 118 находится ниже по течению, на стыке основного русла реки и крупного магистрального канала, выходящего из болота. Бобровый пруд № 38 напрямую не связан с речными системами. Он рас-

Таблица 1. Объем (экз.) исследованного материала

Вид	Номер пруда							
	38	48	118	120	139	354	413	416
II размерный класс								
<i>Acilius canaliculatus</i> (Nicolai, 1822)	5	11	1	0	0	10	0	3
<i>A. sulcatus</i> (L., 1758)	0	2	0	0	1	9	0	2
<i>Graphoderus cinereus</i> (L., 1758)	0	0	7	0	6	0	0	0
<i>Hydaticus aruspex</i> Clark, 1864	5	0	3	0	6	3	0	0
<i>H. seminiger</i> (De Geer, 1774)	7	0	3	0	4	9	0	3
<i>H. transversalis</i> (Pontoppidan, 1763)	0	0	5	0	0	8	0	5
<i>Hydrochara caraboides</i> (L., 1758)	0	9	1	0	3	10	0	0
III размерный класс								
<i>Dytiscus circumcinctus</i> Ahrens, 1811	0	0	4	2	3	1	3	3
<i>D. dimidiatus</i> Bersträsser, 1778	0	0	3	3	3	0	2	1
<i>D. marginalis</i> L., 1758	0	0	3	3	3	3	6	14
Всего	17	22	30	8	29	53	11	31

положен на сети каналов в границах краевой топи болота и наиболее близок к болотному массиву. Пруд № 354 образован на основе временного водотока вне болотной системы и наиболее удален от болотного массива. Все изученные пруды безрыбные, и можно предположить, что хищные жесткокрылые занимают в них высшие позиции в структуре локальной пищевой сети.

Исследовано 10 видов водных жесткокрылых (табл. 1) из 63, известных для заповедника (Дядичко, 2013; Сажнев, Завьялов, 2018): девять видов сем. Dytiscidae, относящихся к хищникам на стадиях личинки и имаго, и один вид сем. Hydrophilidae (*Hydrochara caraboides* (L., 1758)), личинки которого ведут хищный образ жизни, а имаго питаются преимущественно растительными остатками (Archangelsky et al., 2016). Исследованные виды по классификации Петрова (2004) отнесены к II (средняя длина тела 7–18 мм) и III (26–41 мм) размерным классам, различающимся по экологическим и поведенческим параметрам.

Содержание ртути в жуках определяли на атомно-абсорбционном спектрометре с зеemannской коррекцией РА–915+, оборудованном пиролитической приставкой ПИРО (“Люмэкс”, Россия). У жуков II размерного класса содержание ртути определяли индивидуально во всем организме, у жуков III размерного класса (род *Dytiscus*) – в следующих отделах тела: голове и груди (вместе), ногах, крыльях и надкрыльях (вместе), брюшке. Всего исследован 201 экз. жуков (табл. 1).

Точность выполнения анализа контролировали с помощью сертифицированного материала DOLT-1 (Hg = 0.080 ± 0.011 мкг/г сухой массы) и DOLT-2 (Hg = 0.693 ± 0.053 мкг/г сухой массы) (NRC, Канада).

При статистическом анализе для определения зависимости накопления ртути от видовой принадлежности жуков, отдела их тела и местонахождения пруда применяли асимптотический перестановочный тест Фишера–Питмана. Апостериорное сравнение групп проводили с помощью HSD-теста Тьюки. Зависимость накопления рту-

ти от массы тела определяли с помощью рангового коэффициента корреляции Кендалла (τ). Расчеты выполнены в среде статистического анализа R 3.5 с использованием пакета “coin”.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Уровни содержания ртути достоверно различались между видами жуков II размерного класса ($\chi^2 = 32.93, p < 0.01$) (рис. 2). У *Hydrochara caraboides* (сем. Hydrophilidae) выявлено минимальное среднее содержание ртути по сравнению с видами сем. Dytiscidae. Среди Dytiscidae II размерного класса максимальная средняя концентрация ртути отмечена у *Graphoderus cinereus* (L., 1758), минимальная – у *Acilius sulcatus* (L., 1758).

У жуков II размерного класса зарегистрирована общая закономерность в изменении уровня содержания ртути у экземпляров из разных прудов (табл. 2). Максимальные концентрации отмечены у жуков из прудов № 38 и 118, минимальные – из пруда № 354. Промежуточное между предельными значениями содержание ртути выявлено у жуков из прудов № 48, 139 и 416. Исключение составляют *Acilius sulcatus* и *Hydaticus seminiger* (De Geer, 1774), у которых различия между особями из разных прудов по содержанию ртути не достоверны.

Между видами рода *Dytiscus* (III размерный класс) из одного пруда достоверных различий по содержанию ртути не было обнаружено ($\chi^2 = 2.07, p = 0.355$). Концентрация ртути в отделах тела у *D. circumcinctus* Ahrens, 1811 и *D. marginalis* L., 1758 увеличивалась в ряду: крылья + надкрылья–ноги–голова + грудь–брюшко (табл. 3). Причем, концентрации ртути в крыльях + надкрыльях и ногах была достоверно ниже, чем в голове + грудь и брюшке. У *D. dimidiatus* Bersträsser, 1778, напротив, концентрация ртути в голове + грудь выше, чем в брюшке, и значения ртути во всех отделах тела достоверно различаются между собой.

Содержание ртути у трех видов рода *Dytiscus* из разных прудов также достоверно различалось ($\chi^2 = 33.7, p < 0.05$), хотя и в меньшей степени, чем у

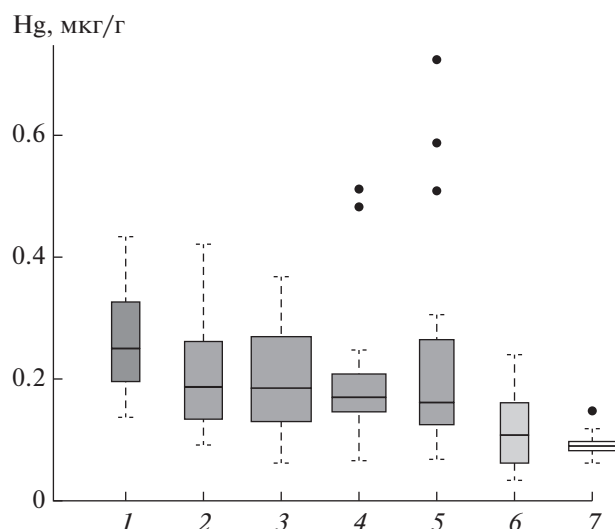


Рис. 2. Накопление ртути у жуков различных видов: средняя линия – медиана, верхняя и нижняя границы “ящика” – первый (Q1) и третий (Q3) квартиль, “усы” – наблюдаемые минимум (Q1–1.5 (Q3–Q1)) и максимум (Q3 + 1.5 (Q3–Q1)), точки – выбросы. Ширина “ящика” пропорциональна объему выборки. 1 – *Graphoderus cinereus*, 2 – *Hydaticus transversalis*, 3 – *Acilius canaliculatus*, 4 – *Hydaticus seminiger*, 5 – *Hydaticus aruspex*, 6 – *A. sulcatus*, 7 – *Hydrochara caraboides*.

жуков II размерного класса. Максимальные показатели были зарегистрированы в пруду № 118, минимальные – в пруду № 354 (табл. 2). Среди остальных прудов по убыванию накопления ртути в жуках выделены две группы: № 416, 120 и № 139, 413.

Концентрация ртути в жуках II размерного класса отрицательно коррелирует с сухой массой тела ($\tau = -5.7, p < 0.05$) (рис. 3). Достоверная связь сухой массы тела с концентрацией ртути у жуков рода *Dytiscus* не выявлена ($\tau = 0.019, p = 0.98$), однако, паттерны зависимости между этими показателями раз-

личаются между видами (рис. 4). Вид *D. circumcinctus* характеризуется наиболее широким размахом между предельными концентрациями ртути по сравнению с другими видами рода. Максимальная сухая масса зарегистрирована у *D. dimidiatus*.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученное среднее содержание ртути в расчете на сухую массу водных жуков из безрыбных бобровых прудов оказалось в 1.5–3 раза ниже такового в мышцах окуня из большинства исследованных озер Полистово-Ловатской системы болот (Камшилова и др., 2013). Максимальная концентрация ртути у отдельных экземпляров жуков, сопоставима с минимальной индивидуальной концентрацией ртути у окуня.

Расположение водоема в каскадной структуре местных геохимических ландшафтов определяет уровень содержания ртути в жуках из разных бобровых прудов Рдейского заповедника. Максимальные значения содержания ртути у жуков II размерного класса в пруду № 38, вероятно, обусловлены его наиболее близким расположением к болотному массиву, откуда с поверхностным стоком поступает больше растворенных органических соединений, и реакция среды смещена в кислую сторону. Отдаленное расположение пруда № 354 от болотного массива, наоборот, приводит к минимальному накоплению ртути в организме обитающих здесь жуков. Наиболее богатый, по сравнению с другими прудами, видовой состав водных жуков (39 видов), также свидетельствует о наличии в этом водоеме более благоприятных условий для данной группы насекомых (Сажнев, Завьялов, 2018).

Повышенные концентрации ртути в жуках из пруда № 118, возможно, связаны с его подчиненным положением в местных ландшафтах. Это предположение согласуется с результатами исследований накопления ртути беспозвоночными бобровых прудов на юге Канады, где было показано,

Таблица 2. Содержание ртути (мкг/г сухой массы) у жуков II размерного класса различных видов из отдельных бобровых прудов

Вид	Номер пруда							
	38	48	120	118	139	354	413	416
<i>Acilius canaliculatus</i>	0.272 ^a	0.208 ^{ab}	–	0.320 ^a	–	0.129 ^{ab}	–	0.215 ^{ab}
<i>A. sulcatus</i>	–	0.157 ^a	–	–	0.151 ^a	0.089 ^a	–	0.169 ^a
<i>Graphoderus cinereus</i>	–	–	–	0.320 ^a	0.188 ^b	–	–	–
<i>Hydaticus aruspex</i>	0.438 ^a	–	–	0.267 ^{ab}	0.151 ^b	0.091 ^b	–	–
<i>H. seminiger</i>	0.155 ^a	–	–	0.205 ^a	0.195 ^a	0.208 ^a	–	0.193 ^a
<i>H. transversalis</i>	–	–	–	0.309 ^a	–	0.153 ^b	–	0.212 ^{ab}
<i>Hydrochara caraboides</i>	0.153 ^a	0.101 ^b	–	–	0.086 ^{bc}	0.076 ^c	–	–
<i>Dytiscus circumcinctus</i>	–	–	0.173 ^a	0.262 ^a	0.209 ^a	0.141 ^a	0.19 ^a	0.229 ^a
<i>D. dimidiatus</i>	–	–	0.155 ^a	0.229 ^a	0.144 ^a	–	0.197 ^a	0.162 ^a
<i>D. marginalis</i>	–	–	0.224 ^{ab}	0.279 ^a	0.171 ^{ab}	0.101 ^b	0.192 ^{ab}	0.228 ^{ab}

Примечание. Значения с разными буквенными надстрочными индексами достоверно различаются у одного вида в разных водоемах (в строках).

Таблица 3. Содержание ртути (мкг/г сухой массы) в отделах тела жуков рода *Dytiscus* (III размерный класс)

Вид	Отдел тела			
	брюшко	голова+грудь	ноги	крылья+надкрылья
<i>D. circumcinctus</i>	0.256 ^a	0.235 ^a	0.147 ^b	0.091 ^b
<i>D. dimidiatus</i>	0.199 ^{ab}	0.231 ^a	0.127 ^{bc}	0.101 ^c
<i>D. marginalis</i>	0.249 ^a	0.236 ^a	0.136 ^b	0.093 ^b

Примечание. Значения с разными буквенными надстрочными индексами в отделах тела одного вида достоверно различаются (в строках).

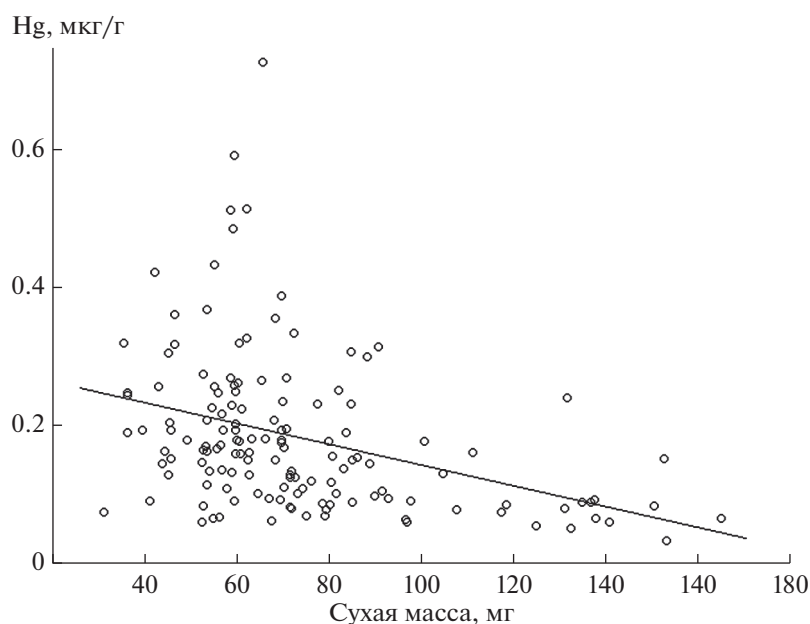
что содержание ртути в животных, отловленных в нижнем течении от бобрового пруда, достоверно выше, чем у животных, обитающих в верхнем течении (Painter et al., 2015; Roy et al., 2009).

Тип питания у членистоногих из одних и тех же местообитаний определяет уровень накопления ртути в организме. Хищные и всеядные виды накапливают достоверно больше ртути, по сравнению с растительноядными (Razavi et al., 2019). Поэтому минимальное накопление металла имаго *Hydrochara caraboides* (Hydrophilidae), по сравнению с жуками сем. Dytiscidae, обусловлено тем, что вид хищничает на стадии личинки, а имаго питается преимущественно растительными остатками (Archangelsky et al., 2016). Рассмотренные виды жесткокрылых сем. Dytiscidae ведут хищный образ жизни и на стадии личинки, и на стадии имаго.

Установлено, что в исследованных прудах близкие виды – представители одного из родов *Acilius* и *Hydaticus* – с разной интенсивностью накапливают металл. Это свидетельствует о принципиальных различиях в их питании, что, вероятно, обеспечивает возможность синтопного обитания. Наибольший размах концентрации ртути у *Dytiscus circumcinctus*, по сравнению с другими ви-

дами рода, по-видимому, обусловлен более широким спектром питания, поскольку известно, что содержание ртути у животных одного вида различается в большом диапазоне из-за разнообразного рациона (Rodenhouse et al., 2019; Wu et al., 2019).

Представители сем. Dytiscidae II размерного класса с относительно меньшей массой тела интенсивнее накапливают ртуть, чем более крупные представители этой размерной группы. Такие результаты согласуются с полученными при изучении прибрежных пауков на северо-востоке США, когда более крупные экземпляры накапливали достоверно меньше ртути, по сравнению с мелкими (Pennuto, Smith, 2015). Наблюдаемая тенденция может быть следствием более высокой скорости метаболизма у видов мелких размеров, требующей употребления большего количества пищи, по сравнению с крупными жуками (Culler et al., 2014). При одинаковом количестве потребленной пищи более высокие значения концентрации ртути у мелких жуков могут быть обусловлены поступлением большего количества ртути на единицу массы тела, в то время как у более крупных видов жуков отмечается эффект биологического разбавления, ранее описанный у рыб (Depew et al., 2013).

**Рис. 3.** Связь сухой массы тела с концентрацией ртути в организме у жуков II размерного класса.

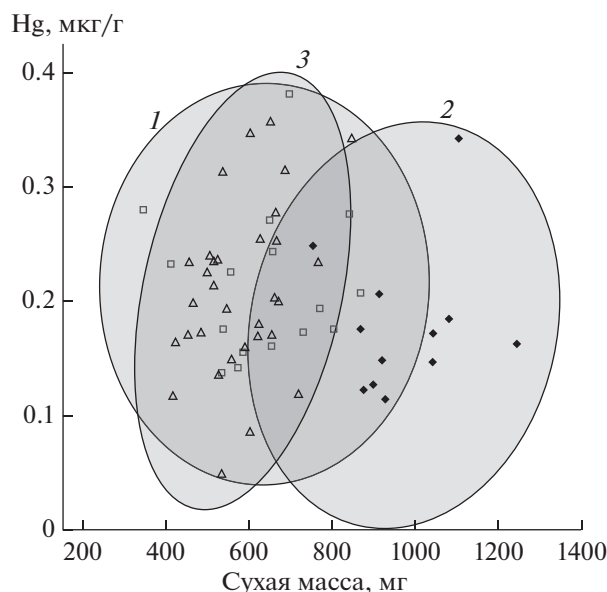


Рис. 4. Распределение концентрации ртути в зависимости от массы тела у представителей рода *Dytiscus*: 1 – *D. circumcinctus*, 2 – *D. dimidiatus*, 3 – *D. marginalis*. В границы эллипсов попадает 95% наблюдений.

Неоднородное накопление ртути разными отделами тела у жуков рода *Dytiscus* характерно для большинства беспозвоночных и позвоночных животных. Исследования *Dytiscus* и *Cybister* из водоема Липецкой обл. показали сходные результаты – в брюшке отмечены достоверно большие концентрации, по сравнению с остальными отделами тела (Udodenko et al., 2019). Неравномерная аккумуляция ртути разными отделами тела ранее зарегистрирована у нехищных насекомых. Так, у перелетной саранчи (*Locusta migratoria* L., 1758) концентрация ртути в брюшке превышала таковую в голове и груди в 1.5–2 раза (Zheng et al., 2008). Меньшие значения концентрации ртути, отмеченные в тканях ног, надкрыльев и крыльев жуков обусловлены большей долей в этих отделах хитинизированных тканей, слабо аккумулирующих ртуть (Clarkson, Magos, 2006), в то время, как в состав тканей головы, груди и брюшка входят белки, содержащие сульфгидрильные группы и аминокислоты, с которыми ртуть способна образовывать ковалентные связи (Немова, 2004).

Выводы. Концентрации ртути в имаго исследованных видов водных жуков, обитающих в бобровых прудах Полистово-Ловатской системы болот, варьируют в широких пределах и ниже, чем в мышцах окуня. Минимальная концентрация отмечена у *Hydrochara caraboides* (Hydrophilidae), питающегося на стадии имаго растительными остатками, у девяти видов Dytiscidae, ведущих хищнический образ жизни на стадиях личинки и имаго, среднее содержание ртути в 1.5–2.5 раза выше. Виды Dytiscidae II размерного класса различались по уровню содержания ртути, у видов рода *Dytiscus* более крупного III размерного класса такие различия не обнаружены. У жуков II размерного класса выявлена связь между массой

тела и содержанием в нем ртути – с увеличением массы концентрация ртути в организме уменьшается. Содержание ртути в различных отделах тела у жуков рода *Dytiscus* неоднородно, низкие концентрации отмечены в отделах тела с высокой долей хитина в составе тканей – ногах, крыльях и надкрыльях, более высокие – в брюшке или голове с грудью, в составе которых помимо хитина присутствуют белки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках государственных заданий АААА-А18-118012690123-4 и АААА-А18-118012690105-0 и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-34-00569.

БЛАГОДАРНОСТИ

За помощь в проведении полевых работ и сбор материала авторы искренне благодарны Н.А. Завьялову (Государственный природный заповедник “Рдейский”, г. Холм, Новгородская обл.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дядичко В.Г. 2013. Водные жуки подотряда Aderphaga (Coleoptera) Полистово-Ловатской болотной системы: видовой состав, биотопическое распределение, особенности биологии // Тр. Гос. природ. заповед. “Рдейский”. Вып. 2. Великий Новгород: Типография “Виконт”. С. 69.
- Завьялов Н.А. 2015. Средообразующая деятельность бобра (*Castor fiber* L.) в европейской части России // Тр. Гос. природ. заповед. “Рдейский”. Вып. 3. Великий Новгород: Типография “Виконт”.
- Камишилова Т.Б., Комов В.Т., Гремячих В.А. 2013. Накопление ртути в мышцах и темпы роста окуня (*Perca fluviatilis*) из озер Полистово-Ловатского верхового болотного массива // Вода: химия и экология. № 12. С. 58.
- Комов В.Т., Гремячих В.А., Удоденко Ю.Г. и др. 2017. Ртуть в абиотических и биотических компонентах водных и наземных экосистем посёлка городского типа на берегу Рыбинского водохранилища // Тр. Ин-та биол. внутр. вод РАН. № 77(80). С. 34.
- Немова Н.Н. 2004. Биохимические эффекты накопления ртути в рыбе. Москва: Наука.
- Петров П.Н. 2004. Водные жесткокрылые подотряда Aderphaga (Coleoptera) Урала и Западной Сибири: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Москва.
- Сажнев А.С., Завьялов Н.А. 2018. Фауна и экология водных жесткокрылых бобровых прудов Рдейского заповедника // Бобры в заповедниках европейской части России // Тр. Гос. природ. заповед. “Рдейский”. Т. 4. Великие Луки: Великолукская типография. С. 423.
- Archangelsky M., Beutel R.B., Komarek A. 2016. Hydrophilidae (Chapter 12.1) // Handbook of Zoology. Coleoptera, Beetles. V. 1. Berlin: De Gruyter. P. 236.
- Arnott S.E., Jackson A., Alarie Y. 2006. The distribution and potential effects of water beetles in lakes recovering from acidification // J. North Am. Benthol. Soc. V. 25. № 4. P. 811.
- Buck D.G., Evers D.C., Adams E. et al. 2019. A global-scale assessment of fish mercury concentrations and the identification of biological hotspots // Sci. Total Envi-

- ron. № 687. P. 956.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.159>
- Clarkson T.W., Magos L. 2006. The toxicology of mercury and its chemical compounds // *Crit. Rev. Toxicol.* V. 36. P. 609.
<https://doi.org/10.1080/10408440600845619>
- Collen P., Gibson R.J. 2000. The general ecology of beavers (*Castor* spp.), as related to their influence on stream ecosystems and riparian habitats, and subsequent effects on fish – a review // *Rev. Fish Biol. Fishery.* V. 10. P. 439.
<https://doi.org/10.1023/A:1012262217012>
- Culler L.E., Shin-ya O., Crumrine P. 2014. Predator-prey interactions of Dytiscids (Chapter 8) // *Ecology, systematics, and the natural history of predaceous diving beetles (Coleoptera: Dytiscidae)*. Dordrecht: Springer. P. 363.
- Depew D.C., Burgess N.M., Anderson M.R. et al. 2013. An overview of mercury concentrations in freshwater fish species: a national fish mercury dataset for Canada // *Can. J. Fish Aquat. Sci.* № 70. P. 436.
<https://doi.org/10.1139/cjfas-2012-0338>
- Driscoll C.T., Mason R.P., Chan H.M. et al. 2013. Mercury as a global pollutant: sources, pathways, and effects // *Environ. Sci. Technol.* V. 47. P. 4967.
<https://doi.org/10.1021/es305071v>
- Greenfield B.K., Hrabik T.R., Harvey C.J., Carpenter S.R. 2001. Predicting mercury levels in yellow perch: use of water chemistry, trophic ecology, and spatial traits // *Can. J. Fish Aquat. Sci.* V. 58. № 7. P. 1419.
<https://doi.org/10.1139/f01-088>
- Haynes K.M., Kane E.S., Potvin L. et al. 2017. Mobility and transport of mercury and methylmercury in peat as a function of changes in water table regime and plant functional groups // *Global Biogeochem. Cycles.* V. 31. № 2. P. 233.
- Lobus, N.V., Komov, V.T. 2016. Mercury in the muscle tissue of fish in the Central and South Vietnam // *Inland Water Biol.* V. 9. № 3. P. 319–328.
<https://doi.org/10.1134/S1995082916030159>
- Painter K.J., Westbrook C.J., Hall B.D. et al. 2015. Effects of in channel beaver impoundments on mercury bioaccumulation in Rocky Mountain stream food webs // *Ecosphere.* V. 6. № 10. P. 1.
<https://doi.org/10.1890/ES15-00167.1>
- Pennuto C.M., Smith M. 2015. From Midges to Spiders: Mercury Biotransport in Riparian Zones Near the Buffalo River Area of Concern (AOC), USA // *Bull. Environ. Contamin. Toxicol.* V. 95. № 6. P. 701.
<https://doi.org/10.1007/s00128-015-1658-6>
- Razavi N.R., Cushman S.F., Halfman J.D. 2019. Mercury bioaccumulation in stream food webs of the Finger Lakes in central New York State, USA // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* № 172. P. 265.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.060>
- Rodenhouse N.L., Lowe W.H., Gebauer R.L. 2019. Mercury bioaccumulation in temperate forest food webs associated with headwater streams // *Sci. Total Environ.* V. 665. P. 1125.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.151>
- Roy V., Amyot M., Carignan R. 2009. Beaver ponds increase methylmercury concentrations in Canadian shield streams along vegetation and pond-age gradients // *Environ. Sci. Technol.* V. 43. № 15. P. 5605.
<https://doi.org/10.1021/es901193x>
- Scheuhammer A., Braune B., Chan H.M. et al. 2015. Recent progress on our understanding of the biological effects of mercury in fish and wildlife in the Canadian Arctic // *Sci. Total Environ.* V. 509–510. P. 91.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.142>
- Selin N.E. 2009. Global Biogeochemical Cycling of Mercury: A Review // *Ann. Rev. Environ. Res.* № 34. P. 43.
<https://doi.org/10.1146/annurev.environ.051308.084314>
- Udodenko Yu.G., Seleznev D.G., Prokin A.A. et al. 2019. Mercury accumulation in adults of two large species of diving beetles (Coleoptera: Dytiscidae) // *Russ. Entomol. J.* V. 28. № 1. P. 23.
<https://doi.org/10.15298/rusentj.28.1.04>
- UN Environment. 2019. Global Mercury Assessment 2018. UN Environment Programme, Chemicals and Health Branch Geneva, Switzerland.
- Wiener J.G., Krabbenhoft D.P., Heinz G.H., Scheuhammer A.M. 2002. *Ecotoxicology of mercury* // *Handbook of Ecotoxicology*. FL: CRC Press, Boca Raton. P. 409.
- Wu P., Kainz M., Åkerblom S. et al. 2019. Terrestrial diet influences mercury bioaccumulation in zooplankton and macroinvertebrates in lakes with differing dissolved organic carbon concentrations // *Sci. Total Environ.* V. 669. P. 821.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.171>
- Zheng D.-M., Wang Q.-C., Zhang Z.-S. et al. 2008. Bioaccumulation of Total and Methyl Mercury by Arthropods // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* № 81. P. 95.
<https://doi.org/10.1007/s00128-008-9393-x>

Mercury in Water Beetles (Coleoptera: Dytiscidae, Hydrophilidae) of Different Size Classes

Yu. G. Udodenko^{1,2,*}, A. A. Prokin^{1,2}, D. G. Seleznev¹, A. S. Sazhnev¹, and E. S. Ivanova²

¹*Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences, Borok, Nekouzskii raion, Yaroslavl oblast, Russia*

²*Cherepovets State University, Cherepovets, Russia*

*e-mail: udu@ibiw.ru

Mercury content in imago of water beetles is studied in beaver ponds situated in the Polist-Lovat Swamp System (Novgorod Oblast, Russia). 201 individuals of 10 species of II and III size classes from families Dytiscidae and Hydrophilidae were observed. It was found that the mercury content in beetles of size class II significantly differs depending on the species ($\chi^2 = 32.93$, $p < 0.01$). The maximum concentrations were found in *Graphoderus cinereus* – 0.259 ± 0.091 $\mu\text{g/g}$ of dry weight, the minimum concentrations in *Hydrochara caraboides* – 0.091 ± 0.020 $\mu\text{g/g}$ of dry weight. There were no significant differences between the species of beetles of size class III. In beetles of size class II with increasing body weight the concentration of mercury in the body decreases ($\tau = -0.31$, $p < 0.01$). It is shown that the mercury content in the body parts of the beetles of the genus *Dytiscus* increased in order: elytra and wings—legs—head, thorax and abdomen.

Keywords: mercury, beaver ponds, aquatic beetles, Polist-Lovat swamp system, Rdeysky Nature Reserve