

**СОДЕРЖАНИЕ РТУТИ И АНТИОКСИДАНТНАЯ СИСТЕМА
У НАСЕКОМОЯДНЫХ (INSECTIVORA, MAMMALIA)
И ГРЫЗУНОВ (RODENTIA, MAMMALIA) РАЗЛИЧНОГО ЭКОГЕНЕЗА**

**Е. П. Антонова¹, В. А. Илюха^{1,2}, В. Т. Комов³, Е. А. Хижкин¹,
С. Н. Сергина¹, В. А. Гремячих³, Т. Б. Камшилова³,
В. В. Белкин¹, А. Е. Якимова¹**

¹ Институт биологии Карельского научного центра РАН
Россия, 185910, Республика Карелия, Петрозаводск, Пушкинская, 11

² Петрозаводский государственный университет
Россия, 185910, Республика Карелия, Петрозаводск, Ленина, 33

³ Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН
Россия, 152742, пос. Борок, Некоузский р-н, Ярославская обл.

E-mail: antoonkina@rambler.ru

Поступила в редакцию 16.06.15 г.

Содержание ртути и антиоксидантная система у насекомоядных (Insectivora, Mammalia) и грызунов (Rodentia, Mammalia) различного экогенеза. – Антонова Е. П., Илюха В. А., Комов В. Т., Хижкин Е. А., Сергина С. Н., Гремячих В. А., Камшилова Т. Б., Белкин В. В., Якимова А. Е. – Целью данного исследования было определение концентрации ртути в тканях млекопитающих, адаптированных к полуводному и подземному образу жизни, и анализ возможной роли антиоксидантной системы в детоксикации тяжелого металла. Исследуемыми видами являлись водяная кутора (*Neomys fodiens* Pennant, 1771), обыкновенный крот (*Talpa europaea* Linnaeus, 1758), ондатра (*Ondatra zibethicus* Linnaeus, 1766) и водяная полёвка (*Arvicola terrestris* Linnaeus, 1758). Результаты нашего исследования показывают, что накопление ртути тканями зависит от возраста, типа ткани и рациона питания вида. У водяной куторы выявлено максимальное содержание ртути по сравнению с другими видами. Отмечены возрастные особенности накопления токсиканта у животных. Выявлена корреляция между концентрацией ртути и активностью каталазы в почках исследуемых видов.

Ключевые слова: *Neomys fodiens*, *Talpa europaea*, *Arvicola terrestris*, *Ondatra zibethicus*, ртуть, антиоксидантная система.

Mercury content and antioxidant system in insectivorous (Insectivora, Mammalia) and rodents (Rodentia, Mammalia) of various ecogenesis. – Antonova E. P., Ilyukha V. A., Kormov V. T., Khizhkin E. A., Sergina S. N., Gremyachikh V. A., Kamshilova T. B., Belkin V. V., and Yakimova A. E. – The present study was aimed at analyzing the total mercury in the tissues of mammals adapted to the semi-aquatic or subterranean lifestyle and at analyzing the possible role of their antioxidant system in heavy metal detoxification. The water shrew (*Neomys fodiens* Pennant, 1771), European mole (*Talpa europaea* Linnaeus 1758), muskrat (*Ondatra zibethicus* Linnaeus, 1766), and water vole (*Arvicola terrestris* Linnaeus, 1758) were the species under study. Our results indicate that the tissue mercury accumulation depends on age, the tissue type and diet of the species. The largest mercury deposition occurred in the water shrew tissues as compared with the other species. Age features of toxicant accumulation in the animals were noted. A correlation between the mercury concentration and the catalase activity in the kidneys of the species investigated was revealed.

ВВЕДЕНИЕ

В природных водах, не испытывающих сильного антропогенного воздействия, ртуть присутствует в очень малых количествах: как правило, несколько нг/л (Лапердина, 2000). Особенностью поверхностных вод Карелии является повышенная заболоченность водосборной площади и, как следствие, высокое содержание гуминовых веществ и водородных ионов (Немова, 2005). Известно, что при низких значениях pH увеличивается подвижность и биодоступность ртути за счет повышенного ее метилирования (Немова, 2005; Комов и др., 2010). При этом метилированные соединения интенсивнее, чем неорганические, аккумулируются биотой и медленнее выводятся из организма, что приводит к более эффективному переносу ртути по трофической цепи по сравнению с прямым поглощением металла животными из окружающей среды (Scheuhammer et al., 2007).

В последнее время уделяется большое внимание изучению аккумуляции ртути и метилртути водными экосистемами (Немова, 2005; Scheuhammer et al., 2007; Brookens et al., 2008), тогда как подобные процессы в наземной фауне остаются малоизученными (Cristol et al., 2008). При этом практически не рассматривается взаимосвязь между физиолого-биохимическим статусом, систематической принадлежностью, экологическими особенностями млекопитающих и интенсивностью накопления ртути в онтогенезе. Для таких исследований удобной моделью могут служить мелкие полуводные млекопитающие, являющиеся консументами различных порядков среднего трофического уровня и участвующие в миграции тяжелых металлов в наземных трофических сетях (Martiniaková et al., 2010). Они имеют относительно короткую продолжительность жизни и не мигрируют на большие расстояния (Talmage, Walton, 1991), что обеспечивает возможность решения временного и пространственного мониторинга распределения металлов в различных биотопах наземных экосистем (Vucetich et al., 2001; Martiniaková et al., 2010).

Полуводные млекопитающие обладают рядом физиологических адаптаций к условиям периодической гипоксии-реоксигенации, связанной с нырянием. Некоторые виды способны снижать метаболический уровень за счёт региональной гипотермии (Butler, Jones, 1997). Ныряльщики также обладают мощной системой антиоксидантной защиты, которая служит для предотвращения потенциальных окислительных повреждений клеточных структур вследствие избыточного образования активных форм кислорода в условиях гипоксии-реоксигенации (Wilhelm Filho et al., 2002).

Известно, что, аккумулируясь в тканях, ртуть и ее соединения блокируют ферменты, контролирующие жизненно важные функции, нарушают структуру молекулы ДНК, а также обмен витаминов и микроэлементов (Lund, Miller, 1993; Mozaffarian, Rimm, 2006). Накопление этого токсического вещества может оказы-

вать негативное влияние на функционирование ферментов системы антиоксидантной защиты, участвующей в приспособительных реакциях полуводных млекопитающих.

Целью настоящего исследования являлось сравнительно-видовое изучение накопления ртути и выявление взаимосвязи этого процесса с физиолого-биохимическими и экологическими особенностями мелких млекопитающих, которые являются потенциальными объектами интоксикации соединениями ртути.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследование выполнено на научном оборудовании Центра коллективного пользования Института биологии Карельского научного центра РАН с соблюдением правил проведения работ с использованием экспериментальных животных (Этическая экспертиза..., 2005).

Исследовали добытых на территории Республики Карелия мелких млекопитающих, принадлежащих к различным систематическим группам и различающихся по типу питания. Образцы тканей органов отбирали после декапитации у отловленных в окрестностях пос. Каскеснаволоок (Карелия) представителей отряда насекомоядные (Insectivora, Mammalia) – молодых ($n = 15$) и взрослых особей ($n = 3$) кутуры водяной (*N. fodiens*) и крота обыкновенного (*T. europaea*) ($n = 6$), а также отряда грызуны (Rodentia, Mammalia) – молодых ($n = 7$) и взрослых особей ($n = 10$) полёвки водяной (*A. terrestris*). Ондатры (*O. zibethicus*) ($n = 23$) отловлены на оз. Миккельское в окрестностях пос. Эссойла (Карелия). Выборка состояла из самцов ($n = 5$) и самок ($n = 6$) первой генерации (возраст 5 – 6 месяцев) и взрослых самцов ($n = 8$) и самок ($n = 4$) (возраст от 12 месяцев).

Содержание ртути в образцах определяли на ртутном анализаторе РА-915+ с приставкой ПИРО («Люмэкс», г. Санкт-Петербург) атомно-абсорбционным методом холодного пара без предварительной пробоподготовки. Точность аналитических методов измерения контролировали с использованием сертифицированного биологического материала DORM-2 и DOLM-2 (Институт химии окружающей среды, Оттава, Канада). Концентрации ретинола и α -токоферола определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (Скурихин, Двинская, 1989), стандартами служили ретинол и α -токоферол фирмы «Sigma» (США). Активность антиоксидантных ферментов (АОФ) измеряли спектрофотометрически: супероксиддисмутазы (СОД) – по модифицированной адренохромной методике (Misra, Fridovich, 1972) и каталазы – по количеству разложенной H_2O_2 (Bears, Sizer, 1952).

Полученные данные обрабатывали общепринятыми методами вариационной статистики, сравнение проводили с применением непараметрического критерия Вилкоксона – Манна – Уитни.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание ртути у животных различного экогенеза. В результате проведенного исследования выявлена тканеспецифичность распределения ртути у представителей двух отрядов млекопитающих. Печень и почки характеризовались максимальным количеством ртути, тогда как скелетная мышца – минимальным. При

этом необходимо отметить, что у обыкновенного крота, водяной полёвки и ондатры максимальное содержание ртути обнаружено в почках, а у водяной куторы – в печени (таблица). Отмеченные нами органо-тканевые особенности накопления токсиканта связаны, вероятно, с детоксикационной функцией органов (Brookens et al., 2008; Cristol et al., 2008).

Содержание ртути и активность антиоксидантных ферментов в органах и тканях четырех видов млекопитающих ($M \pm m$)

Вид животного / Исследуемый орган (ткань)	Содержание ртути, мг/кг ткани	Активность СОД, у.е./г ткани	Активность каталазы, у.е./г ткани
Кутора водяная, $n = 18$			
Печень	0.972±0.419	561.2±36.9	669.5±26.8
Почки	0.347±0.045	274.8±23.6	102.3±8.0
Ск. мышца	0.622±0.253	186.7±13.3	46.1±4.8
Крот обыкновенный, $n = 6$			
Печень	0.078±0.0199 ¹	479.6±96.1 ¹	1044.6±67.1 ¹
Почки	0.184±0.059	310.7±34.9	251.2±12.9 ¹
Ск. мышца	0.053±0.024 ¹	223.9±7.1	60.8±6.3
Полёвка водяная, $n = 17$			
Печень	0.002±0.001 ^{1, 2}	525.7±43.4 ¹	598.8±36.7 ²
Почки	0.005±0.002 ^{1, 2}	304.3±29.6	255.5±6.6 ¹
Ск. мышца	0.002±0.001 ¹²	156.9±19.2 ¹²	38.9±3.8
Ондатра, $n = 24$			
Печень	0.006±0.001 ^{1, 2}	880.6±64.1 ^{2, 3}	929.4±29.8 ^{1, 3}
Почки	0.015±0.004 ^{1, 2, 3}	464.6±18.1 ^{2, 3}	231.0±4.7 ^{1, 3}
Ск. мышца	0.003±0.001 ^{1, 2}	213.7±8.6 ^{1, 3}	23.4±1.9 ^{1, 2}

Примечание. ¹ – различия достоверны по сравнению с водяной куторой ($p < 0.05$); ² – различия достоверны по сравнению с кротом ($p < 0.05$); ³ – различия достоверны по сравнению с водяной полёвкой ($p < 0.05$).

Межвидовые различия концентрации ртути в тканях у мелких млекопитающих связаны, прежде всего, с типом питания. Так, исследованные представители отряда насекомоядные, питающиеся в основном животной пищей, имели более высокий уровень токсиканта в отличие от животных отряда грызуны (см. таблицу). Среди всех изученных видов наибольшие концентрации ртути в органах обнаружены у водяной куторы (насекомоядные). У более крупного представителя этого же отряда – обыкновенного крота – содержание ртути в тканях было значительно выше по сравнению с водяной полёвкой и ондатрой. При этом у последних (представители отряда грызуны) накопление токсиканта органами различалось незначительно. Уровень ртути был несколько выше у ондатры, чем у водяной полёвки (см. таблицу).

Возрастные особенности содержания ртути. Накопление ртути в онтогенезе у всех исследованных видов характеризовалось прямой зависимостью concentra-

ции токсиканта от возраста. Содержание ртути в органах было значительно выше у взрослых животных по сравнению с молодыми. При этом у насекомоядных (водяная кутора) возрастное накопление ртути происходило интенсивнее в печени и скелетной мышечной ткани, а у грызунов – в почках. Так, у молодых особей водяной куторы в печени и скелетной мышце содержание ртути более чем в 5 раз ниже, чем у взрослых, обитающих в одинаковых экологических условиях. Во всех тканях водяной полевки и ондатры обнаружено достоверное увеличение уровня ртути с возрастом. В почках у взрослых особей ондатры концентрация токсиканта в два раза выше ($p < 0.05$), чем у молодых, обитающих в одинаковых экологических условиях (оз. Микельское) (рис. 1).

Активность антиоксидантных ферментов. Исследование активности АОФ у представителей отрядов насекомоядные и грызуны позволило выявить общие, свойственные и другим млекопитающим, закономерности распределения активности антиоксидантных ферментов в органах (Marklund, Karlsson, 1990; Wilhelm Filho et al., 2002): максимальная активность данных ферментов обнаружена в печени, меньшая – в почках и самая низкая – в скелетной мышце (см. таблицу). Тем не менее, в тканях изученных животных выявлена высокая межвидовая вариабельность активности и СОД, и каталазы. Наибольшая активность

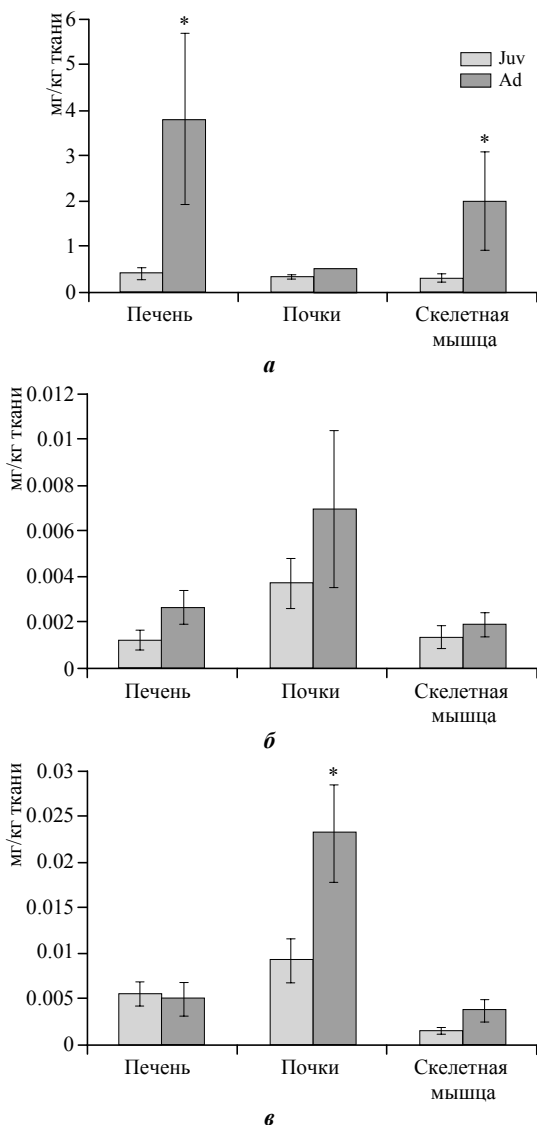


Рис. 1. Содержание ртути в органах водяной куторы (а), водяной полевки (б) и ондатры (в) разных возрастов ($M \pm m$): Juv – молодые животные, Ad – взрослые животные, * – различия достоверны по сравнению с молодыми животными у одного вида ($p < 0.05$)

СОД обнаружена в печени ондатры, а каталазы – в печени обыкновенного крота. У водяной полёвки (представитель отряда грызуны) активность СОД во всех исследованных органах была достоверно ниже, чем у ондатры. У куторы, отличающейся высокой интенсивностью метаболизма, в печени и скелетной мышце активность изучаемых ферментов была выше, чем у водяной полёвки, тогда как активность каталазы в почках – достоверно ниже при сравнении с ондатрой, водяной полёвкой и кротом (см. таблицу).

Проведенные исследования позволили выявить особенности накопления ртути и реакций ферментов антиоксидантной системы на повышение уровня токсиканта у млекопитающих различного экогенеза, представителей отрядов насекомоядные и грызуны. В большинстве ранее проведенных исследований содержание Hg определялось в печени и почках млекопитающих, т.е. в органах, выполняющих функцию детоксикации (Brookens et al., 2008; Cristol et al., 2008). Однако для более объективной оценки накопления и распределения ртути в организме млекопитающих необходимо расширить спектр анализируемых органов, так как соотношение различных форм ртути между органами не одинаково. Доля более токсичной для теплокровных животных метилртути выше в мышцах и мозге, чем в печени и почках (Strom, 2008). Мышечная ткань, составляющая значительную долю массы тела млекопитающих, вероятно, выступает в их организме основным депо аккумулированной ртути.

Содержание ртути в органах насекомоядных северо-запада России варьирует в пределах 0.035 – 0.43 мг/кг сырой массы (Vucetich et al., 2001). В нашем исследовании обращает на себя внимание факт значительно более высокой концентрации токсиканта у представителя насекомоядных – водяной куторы (0.62 – 0.97 мг/кг сырой массы) (см. таблицу). Такое высокое содержание ртути в органах куторы может быть связано с физиолого-биохимическими особенностями, присущими этому виду. Куторы для обеспечения интенсивного метаболизма потребляют преимущественно животные корма, что наряду с высокой скоростью обменных процессов и приводит к усиленному накоплению ртути. Сходные результаты были получены в исследовании В. Т. Комова и соавт. (2010). Авторами показано, что концентрация ртути во всех исследованных органах бурозубок статистически значимо выше концентраций, зарегистрированных в органах полёвок. Предполагается, что ртуть в организм мелких млекопитающих поступает преимущественно с животными объектами питания (основа кормового спектра обыкновенной бурозубки) и в меньшей степени – с растительной пищей (основа кормового спектра рыжей полёвки). Подтверждением этого служат ранее установленные закономерности биоаккумуляции металла: увеличение концентрации Hg в живых организмах с продвижением по трофической цепи (Wiener et al., 2002), а также более интенсивное накопление тяжелых металлов плотоядными и всеядными млекопитающими по сравнению с растительноядными видами (Ma et al., 1991).

Некоторые авторы связывают высокую вариабельность концентраций тяжелых металлов в организмах мелких млекопитающих с различной долей содержания дождевых червей в их рационе питания (Ma et al., 1991). Имея максимальную биомассу среди почвенных беспозвоночных, дождевые черви являются важным звеном пищевых цепей, включающих в том числе и представителей мелких млекопитающих (Hsu et al., 2006). Считается, что земляные черви играют значитель-

ную роль в биогеохимическом круговороте тяжелых металлов и накапливают их более интенсивно, чем растения и насекомые, что связано с условиями их жизни и особенностями питания (Reinecke et al., 1999). Тем не менее, утверждение о том, что преобладание земляных червей в рационе приводит к большему накоплению ртути, не подтверждается нашими данными. Дождевые черви – это основа питания крота обыкновенного (Соколов, 1984), в печени и скелетной мышце которого содержание ртути достоверно ниже по сравнению с куторой ($p < 0.05$), у которой в пищевом спектре преобладают водные насекомые и их личинки, дождевые черви, реже моллюски, мелкая рыба, головастики лягушек (Авагян, 2009).

У растительноядных млекопитающих – полуводных крупных грызунов (*Castor fiber* Linnaeus, 1758 и *O. zibethicus*), а также у представителей семейств зайцеобразных (Lagomorpha) и парнокопытных (Artiodactyla) – содержание ртути в органах, как правило, не превышает 0.2 мг/кг (Kryncki et al., 1982). То, что пищевой фактор влияет на содержания ртути, подтверждают и данные по водяной полёвке и ондатре. У полёвки как растительноядного вида накопление ртути в печени и почках почти в два раза ниже, чем у ондатры (см. рис. 1). В качестве корма ондатра использует не только растения, но и моллюсков, лягушек, раков и жуков (Харадов, Кустарева, 2012).

При изучении возрастных особенностей накопления ртути у исследуемых животных выявлено, что у куторы, водяной полёвки и ондатры с возрастом содержание ртути увеличивается. Необходимо отметить, что содержание токсиканта у ювенильных кутор в печени в 8 раз и скелетной мышце более чем в 5 раз ниже, чем у взрослых особей, тогда как у половозрелых ондатр только в почках обнаружено достоверное увеличение концентрации ртути (см. рис. 1). Значительное увеличение с возрастом концентрации ртути в органах водяной куторы по сравнению с ондатрой может быть связано не только с типом питания, но и с экологическими особенностями этих видов. Некоторые исследователи относят кутору к околотоводным животным, поскольку она менее всех связана с водной средой и проводит гораздо больше времени на суше, чем в воде, питаясь при этом не только водными, но и почвенными беспозвоночными (Галанцев, 1977). Возможно, выявленное нами значительное возрастное увеличение концентрации ртути у куторы зависит от уровня токсиканта в почве. Так, например, в исследовании Е. С. Ивановой (2013) была установлена корреляционная зависимость между содержанием ртути во всех органах бурозубок и количеством металла в почве, тогда как такая зависимость в органах мышевидных грызунов выражена в меньшей степени или не достоверна.

Спектр патологических изменений в клетках живых организмов при воздействии ртути достаточно широк: подавление белкового синтеза и снижение активности ферментов, приводящее в том числе к нарушениям метаболизма многих биологически активных веществ; активация свободнорадикального и перекисного окисления с повреждением важнейших молекулярных структур и биомембран (Габайдуллин и др., 1999). Известно, что активность АОФ зависит в значительной степени от уровня метаболизма, присущего для каждого организма. Чем он выше, тем, как правило, больше активность АОФ.

Токсические эффекты ртути связаны со способностью метилртути взаимодействовать с сульфгидрильными группами ферментов, ионных каналов и рецепторов, что приводит к нарушению работы антиоксидантной системы и усиленной

генерации свободных радикалов и активных форм кислорода (Lund, Miller, 1993; Mozaffarian, Rimm, 2006). Исследование состояния систем генерации и тушения активных форм кислорода крыс показало, что уже при концентрациях загрязнителя 1.5 мкг/кг массы происходят существенные изменения этих систем (Lund, Miller, 1993).

Нами была выявлена зависимость изменения активности каталазы в почках исследованных видов от уровня ртути, которая описывается уравнением $y = \exp(5.49 - 1.66 \cdot x)$, где y – активность каталазы, а x – содержание ртути ($r = -0.64$; $p < 0.0001$) (рис. 2). Анализ этого уравнения позволяет сделать вывод об отрицательном влиянии ртути на активность каталазы. Возможно, значительно более высокое содержание ртути в почках у куторы (0.347 ± 0.045 мг/кг ткани) при сравнении с водяной полёвкой (0.005 ± 0.002 мг/кг ткани) оказало негативное воздействие

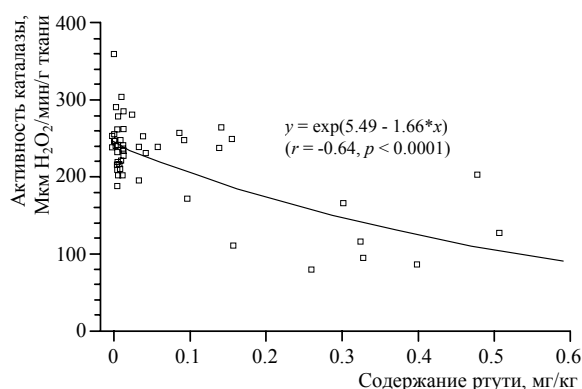


Рис. 2. Зависимость между уровнем активности каталазы и содержанием ртути в почках у исследованных млекопитающих

на активность каталазы. У куторы, отличающейся высокой интенсивностью метаболизма, в печени и скелетной мышце активность изучаемых антиоксидантных ферментов была выше, чем у водяной полёвки, тогда как в почках – ниже. Нами не было обнаружено зависимости между содержанием ртути и количеством витаминов Е и А, что свидетельствует об отсутствии существенной нагрузки на этот компонент антиоксидантной системы животных. Отмеченное влияние ртути на ферменты, вероятно, связано с воздействием на SH-группы низкомолекулярных соединений, что подтверждается нашими предыдущими исследованиями на фермерских хищных млекопитающих (Хижкин и др., 2012). Было показано, что при низких концентрациях ртути в почках (до 0.15 мг/кг ткани) количество небелковых SH-групп, с которыми может связаться металл для последующего выведения, возрастает параллельно с увеличением концентрации токсиканта. При дальнейшем увеличении его концентрации организм не способен обеспечить достаточное количество соединений с SH-группами, чтобы эффективно выводить ртуть из организма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, накопление ртути у исследованных млекопитающих зависело от экологических особенностей вида, прежде всего от типа питания и, соответственно, от интенсивности клеточного и тканевого метаболизма. Важную роль в передаче ртути внутри экосистемы играет способность металла накапливаться по пищевой цепи (Wiener, 2002; Scheuhammer et al., 2007). В организм мелких млеко-

питающих ртуть преимущественно поступает с животными объектами питания и в меньшей степени с растительной пищей. Сравнение молодых и взрослых животных, обитающих в одинаковых экологических условиях (ондатра, водяная полёвка, кутора), показало, что с возрастом у этих видов количество ртути увеличивается. Максимальная концентрация ртути в органах отмечена у насекомоядных (водяная кутора, обыкновенный крот), а у растительноядных грызунов (полёвка водяная и ондатра) уровень металла был минимальным. У изученных животных выявлена высокая межвидовая вариабельность активности СОД и каталазы в исследуемых органах. Наибольшая активность СОД обнаружена в печени ондатры, у обыкновенного крота в этом же органе выявлена максимальная активность каталазы. Накопление высоких концентраций ртути приводило к ингибированию активности каталазы в почках исследованных видов насекомоядных и грызунов.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Президента РФ (проект № НШ-1410.2014.4) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-34-00283 мол_а), средств федерального бюджета на выполнение государственного задания (тема № 0221-2014-0001 и тема № 0221-2014-0006), программы фундаментальных исследований Отделения биологических наук «Биологические ресурсы России: динамика в условиях глобальных климатических и антропогенных воздействий» и программы стратегического развития Петрозаводского государственного университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авагян А. А. Экология и распространение водяной землеройки (куторы) *Neomys fodiens* в Армении // Биол. журн. Армении. 2009. № 2 (61). С. 49 – 52.
- Габайдуллин А. Г., Ильина Е. М., Рыжов В. В., Халитова Р. Я. Охрана окружающей среды от ртутного загрязнения. Казань : Изд-во «Магариф», 1999. 95 с.
- Галанцев В. П. Эволюция адаптаций ныряющих животных. Эколого- и морфофизиологические аспекты. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1977. 191 с.
- Иванова Е. С. Закономерности накопления и распределения ртути в компонентах наземных экосистем Вологодской области : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Борок, 2013. 24 с.
- Комов В. Т., Гремячих В. А., Сапельников С. Ф., Удоденко Ю. Г. Содержание ртути в почвах и в мелких млекопитающих различных биотопов Воронежского заповедника // Ртуть в биосфере : эколого-геохимические аспекты : материалы междунар. симп. / Ин-т геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН. М., 2010. С. 281 – 286.
- Лапердина Т. Г. Определение ртути в природных водах. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 2000. 222 с.
- Немова Н. Н. Биохимическая адаптация накопления ртути у рыб. М. : Наука, 2005. 164 с.
- Скурихин В. Н., Двинская Л. М. Определение α -токоферола и ретинола в плазме крови сельскохозяйственных животных методом микроколоночной высокоэффективной жидкостной хроматографии // Сельскохозяйственная биология. 1989. № 4. С. 127 – 129.
- Соколов Ф. П. Экологические особенности обыкновенного крота (*Talpa europaea* L.) Верхнего Поволжья : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск, 1984. 22 с.
- Харадов А. В., Кустарева Л. А. Животные корма в питании ондатры *Ondatra zibethicus* L. // Бюл. МОИП. Отд. биологический. 2012. Т. 117, № 6. С. 3 – 10.
- Хижкин Е. А., Илюха В. А., Комов В. Т., Паркалов И. В., Ильина Т. Н., Башиникова И. В., Сергина С. Н., Гремячих В. А., Камшилова Т. Б., Степина Е. С. Видовые особенности содержания ртути в органах хищных млекопитающих различного экогенеза // Тр. Карельского науч. центра РАН. 2012. № 2. С. 147 – 153.

Этическая экспертиза биомедицинских исследований. Практические рекомендации / под ред. Ю. Б. Белоусова / Рос. о-во клинических исследователей. М., 2005. 156 с.

Bears R. F., Sizer I. N. A spectral method for measuring the breakdown of hydrogen peroxide by catalase // J. Biological Chemistry. 1952. Vol. 195, № 1. P. 133 – 140.

Brookens T. J., O'Hara T. M., Taylor R. J., Bratton G. R., Harvey J. T. Total mercury body burden in Pacific harbor seal, *Phoca vitulina richardii*, pups from central California // Marine Pollution Bull. 2008. Vol. 56. P. 27 – 41.

Butler P. J., Jones D. R. Physiology of diving of birds and mammals // Physiological Reviews. 1997. Vol. 77, № 3. P. 837 – 899.

Cristol D., Brasso R. L., Condon A. M., Fovargue R. E., Friedman S. L., Hallinger K. K., Monroe A. P., White A. E. The movement of aquatic mercury through terrestrial food webs // Science. 2008. Vol. 320. P. 335.

Hsu M. J., Selvaraj K., Agoramoorthy G. Taiwan's industrial heavy metal pollution threatens terrestrial biota // Environmental Pollution. 2006. Vol. 143, № 2. P. 327 – 334.

Kryniski A., Kaluzinski J., Wlazeiko M., Adamowski A. Contamination of roe deer by mercury compounds // Acta Theriol. 1982. Vol. 27. P. 499 – 507.

Lund B. O., Miller D. M. Studies in Hg-induced H₂O₂ production and lipid peroxidation *in vitro* in rat kidney mitochondria // Biochemical Pharmacology. 1993. Vol. 45, № 10. P. 2017 – 2024.

Ma W. C., Denneman W., Faber J. Hazardous exposure of groundliving small mammals to Cd and Pb in contaminated terrestrial ecosystems // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 1991. Vol. 20, № 2. P. 266 – 270.

Marklund S. L., Karlsson K. Extracellular superoxide dismutase, distribution in the body and therapeutic implications // Antioxidants in Therapy and Preventive Medicine. N. Y. : Plenum Press, 1990. P. 1 – 4.

Martiniaková M., Omelka R., Grosskopf B., Jančová A. Yellow-necked mice (*Apodemus flavicollis*) and bank voles (*Myodes glareolus*) as zoomonitors of environmental contamination at a polluted area in Slovakia // Acta Veterinaria Scandinavica. 2010. Vol. 52, № 1. P. 58 – 68.

Misra H. P., Fridovich I. The role of superoxide anion in the autoxidation of epinephrine and a simple assay for superoxide dismutase // J. Biological Chemistry. 1972. Vol. 247, № 10. P. 3170 – 3175.

Mozaffarian D., Rimm E. B. Fish intake, contaminants, and human health evaluating the risks and the benefits // JAMA. 2006. Vol. 296, № 15. P. 1885 – 1899.

Reinecke S. A., Prinsloo M. W., Reinecke A. J. Resistance of *Eisenia fetida* (Oligochaeta) to cadmium after long-term exposure // Ecotoxicology and Environmental Safety. 1999. Vol. 42, № 1. P. 75 – 80.

Scheuhammer A. M., Meyer M. W., Sandheinrich M. B., Murray M. W. Effects of environmental methylmercury on the health of wild birds, mammals, and fish // Ambio. 2007. Vol. 36, № 1. P. 12 – 18.

Strom S. M. Total mercury and methylmercury residues in river otters (*Lutra canadensis*) from Wisconsin // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2008. Vol. 54, № 3. P. 546 – 554.

Talmage S. S., Walton B. T. Small mammals as monitors of environmental contaminants // Reviews Environmental Contamination Toxicology. 1991. Vol. 119. P. 47 – 145.

Vucetich L. M., Vucetich J. A., Cleckner L. B., Gorski P. R., Peterson R. O. Mercury concentration in deer mouse (*Peromyscus maniculatus*) tissues from Isle Royale National Park // Environmental Pollution. 2001. Vol. 114. P. 113 – 118.

Wiener J. G., Krabbenhoft D. P., Heinz G. H., Scheuhammer A. M. Ecotoxicology of mercury // Handbook of Ecotoxicology. Boca Raton : Lewis Publishers, 2002. P. 409 – 463.

Wilhelm Filho D., Sell F., Ribeiro L., Ghislandi M., Carrasquedo F., Fraga C. G., Wallauer J. P., Simões-Lopes P. C., Uhart M. M. Comparison between the antioxidant status of terrestrial and diving mammals // Comparative Biochemistry and Physiology. 2002. Vol. 133, № 3. P. 885 – 892.