

УДК 591.145.2: 636.934

## ВИДОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОДЕРЖАНИЯ РТУТИ В ОРГАНАХ ХИЩНЫХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ РАЗЛИЧНОГО ЭКОГЕНЕЗА

Е. А. Хижкин<sup>1</sup>, В. А. Илюха<sup>1,2</sup>, В. Т. Комов<sup>3</sup>, И. В. Паркалов<sup>4</sup>,  
Т. Н. Ильина<sup>1</sup>, И. В. Баишникова<sup>1</sup>, С. Н. Сергина<sup>1</sup>, В. А. Гремячих<sup>3</sup>,  
Т. Б. Камшилова<sup>3</sup>, Е. С. Степина<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт биологии Карельского научного центра РАН

<sup>2</sup> Петрозаводский государственный университет

<sup>3</sup> Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН

<sup>4</sup> ООО «Северная пушнина»

Накопление ртути у разводимых в неволе хищных млекопитающих зависело от экологических особенностей вида и могло определяться кормовой базой исследованных животных. Генотипические особенности животных также отражаются на способности накапливать соединения ртути. Изменения антиоксидантной системы связаны с участием ее отдельных компонентов в детоксикации.

Ключевые слова: ртуть, хищные млекопитающие, антиоксидантная система.

**E. A. Khizhkin, V. A. Ilyukha, V. T. Komov, I. V. Parkalov, T. N. Ilyina, I. V. Baishnikova, S. N. Sergina, V. A. Gremyachikh, T. B. Kamshilova, E. S. Stepina. SPECIES-SPECIFIC FEATURES OF MERCURY CONTENT IN ORGANS OF CARNIVOROUS MAMMALS OF DIFFERENT ECOGENESIS**

Accumulation of mercury in carnivorous mammals reared in captivity depends on the ecological characteristics of the species and could be related to the diet of the animals in question. The genotypic features of the animals also tell on the mercury storage capacity. Changes in the antioxidant system occur in correlation with the participation of its individual components in detoxication.

Key words: mercury, carnivorous mammals, antioxidant system.

### Введение

Экологическая опасность ртути и последствия ее негативного влияния на организм представляют на сегодняшний день серьезную проблему. Ртуть занимает особое место среди поллютантов в связи с аномально высокой эффективностью ее усвоения, биодоступностью, чрезвычайно низкой скоростью выведения и высокой токсичностью для жи-

вотных и человека. Отдельные соединения ртути различаются по своей токсичности и устойчивости, но наиболее опасным и стабильным является метилртуть [Немова, 2005; Медведев, Ивантер, 2007]. Аккумулируясь в тканях, ртуть и ее соединения блокируют белки-ферменты, контролирующие жизненно важные функции, нарушают структуру молекулы ДНК, а также обмен витаминов и микроэлементов.

В отличие от того внимания, которое уделяется исследованию аккумуляции ртути и метилртути водными экосистемами [Немова, 2005], подобные процессы в наземной фауне остаются малоизученными [Grigal, 2003]. Основная масса исследований по накоплению ртути млекопитающими проводится при нагрузке сублетальными или летальными дозами токсиканта с использованием в качестве объектов преимущественно лабораторных животных [Basu et al., 2007]. При этом взаимосвязь между физиолого-биохимическим статусом, систематической принадлежностью, экологическими особенностями млекопитающих и интенсивностью накопления поллютанта практически не изучена. Наряду с животными, обитающими в природе, введенные в зоокультуру хищные млекопитающие представляют уникальный объект для исследований такого рода, поскольку, несмотря на достаточно длительное время разведения в условиях неволи, у них сохранились характерные для диких предков особенности: моноэстричность, строгая сезонная цикличность многих процессов и др.

Цель настоящего исследования – сравнительно-видовое изучение накопления ртути и выявление взаимосвязи этого процесса с физиолого-биохимическими и экологическими особенностями норок, лисиц, песцов, енотовидных собак и лисо-песцовых гибридов, являющихся в связи с особенностями их питания потенциальными объектами интоксикации соединениями ртути.

## Материал и методы

Исследовали 7-месячных животных (самцы и самки) клеточного содержания семейства *Canidae* – енотовидные собаки (*Nyctereutes procyonoides* Gray), вуалевые песцы (*Alopex lagopus* L.), серебристо-черные лисицы (*Vulpes vulpes* L.) и лисо-песцовые гибриды (*Alopex-Vulpes hybrids*) и семейства *Mustelidae* – серебристо-голубые и пастелевые норки (*Neovison vison* Shr.). Лисо-песцовые гибриды были получены при скрещивании самок песца шедоу с самцами серебристо-черных лисиц (светлый окрас) и при скрещивании самок вуалевого песца с самцами серебристо-черных лисиц (темный окрас). Песцы, лисицы и норки двух окрасов были выращены в зверохозяйстве ЗАО «Пряжинское» (Республика Карелия), енотовидные собаки и гибриды – на звероферме ООО «Северная пушнина» (филиал «Знаменка», Псковская область).

Образцы тканей печени, почек и скелетной мышцы отбирали в период планового забоя животных. Содержание ртути в образцах определяли на ртутном анализаторе РА-915+ с приставкой ПИРО (Люмэкс) 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  $\alpha$ -токоферола определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии [Скурихин, Двинская, 1989], стандартами служили ретинол и  $\alpha$ -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]. Уровень восстановленного глутатиона определяли по методу Элмана [Sedlak, 1968].

Полученные данные обрабатывали общепринятыми методами вариационной статистики, сравнение проводили с применением непараметрического критерия Вилкоксона – Манна – Уитни [Коросов, Горбач, 2007]. Работа выполнена с соблюдением правил проведения работ с использованием экспериментальных животных [Этическая экспертиза..., 2005].

## Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований были выявлены различия в концентрациях ртути в органах и тканях: у всех исследованных представителей семейств *Canidae* и *Mustelidae* больше всего ртути содержалось в почках, меньше – в печени и мышцах. Отмечены значительные межвидовые и внутривидовые различия в уровне накопления ртути. Как и в природе, ее максимальное количество отмечено у енотовидной собаки (рис. 1). Если у отловленных в природе енотовидных собак содержание металла в печени было максимально (0,5–1,0 мг/кг) икратно выше, чем в почках и мышцах [Комов, 2010], то у выращенных на ферме животных уровень поллютанта был ниже и одинаковым в печени и почках (0,13–0,25 мг/кг). В отличие от лисиц и песцов (рис. 1), у которых содержание ртути во всех исследованных органах было минимальным среди представителей семейства *Canidae*, у лисо-песцовых гибридов обоих окрасов уровень металла был значительно выше – 0,07–0,10 мг/кг в печени,

0,17–0,22 мг/кг в почках и 0,02–0,03 мг/кг в мышцах. Одной из причин довольно высокой степени аккумуляции поллютанта у енотовидных собак и гибридов и низкой у лисиц и песцов могут являться различия в кормовом рационе на звероферме ООО «Северная пушнина» и в зверохозяйстве ЗАО «Пряжинское». Помимо этого, высокое содержание ртути в органах енотовидной собаки может быть связано с особенностями ее экологии – в осенний период у нее происходит интенсификация анаболических процессов и накопление больших запасов жира, в котором способно откладываться значительное количество метилртути. Период биологического полураспада этого токсиканта, особенно в организмах с низким уровнем обмена веществ, необычайно длителен (у человека 70 дней), поэтому яд не выделяется, а, наоборот, задерживается в организме.

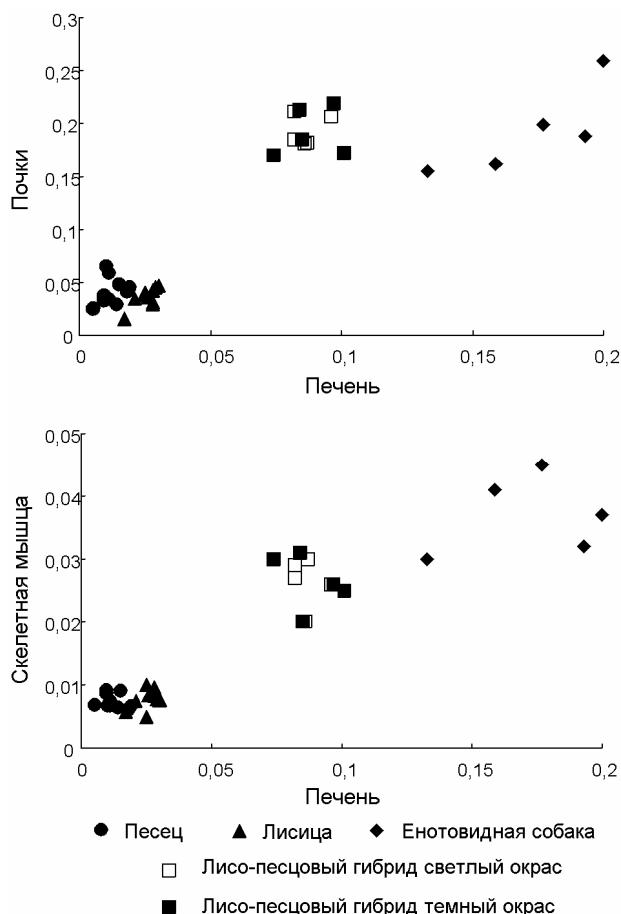


Рис. 1. Содержание ртути (мг/кг ткани) в органах млекопитающих семейства *Canidae*

Для природных популяций установлено [Комов, 2010], что представители мелких куньих (ласка, горностай) содержали ртуть в меньших количествах (до 0,3 мг/кг), чем крупные (норка, выдра, хорь). У последних среднее содержание

металла в мышечной ткани составило 0,3–0,5, в печени и почках – 0,5–0,7 мг/кг сырой массы. В отличие от этого у разводимых в неволе норок двух окрасов (серебристо-голубых и пастелевых) во всех исследованных тканях отмечена более высокая (в 2–6 раз) концентрация ртути (рис. 2), по сравнению с лисами и песцами (рис. 1). Наблюдаемое явление, как и в случае с енотовидной собакой, могло быть обусловлено более высокой интенсивностью удельного метаболизма.

Известно, что активность антиоксидантных ферментов зависит в значительной степени от уровня метаболизма, присущего для каждого организма [Зенков и др., 2001]. Чем он выше, тем, как правило, больше активность АОФ. У норок ввиду их морфо-анатомических особенностей (вытянутая форма тела и др.) уровень основного обмена существенно больше, чем у песцов и лисиц [Casey et al., 1979]. По всей видимости, именно по этой причине в нашем исследовании установлена прямая корреляционная зависимость между уровнем ртути и активностью СОД и каталазы в печени (рис. 3). Активность АОФ и содержание поллютанта были выше у исследованных представителей семейства *Mustelidae*, по сравнению с песцами и лисицами.

То, что у норок содержание ртути в органах выше, чем у песцов и лисиц, также может быть связано с особенностями кормления этих животных – в период забоя норкам скармливают тушки лисиц и песцов. Такой зоотехнический прием не представляет для норок опасности, так как пороговая концентрация ртути в пище норки, вызывающая функциональные нарушения, равна 1,1 мг/кг сырой массы [Scheuhammer et al., 2007]. Имеется как минимум один документально зарегистрированный факт смерти наземного хищника от отравления ртутью – пантеры [Facemire et al., 1995]. Основным источником ртути для пантеры послужили еноты – рыбоядные наземные хищники.

Имеющиеся данные свидетельствуют о различной чувствительности представителей даже одного вида к воздействию токсиканта. Так, в исследованиях на человеке установлено [James et al., 2004], что аутисты и страдающие болезнью Альцгеймера более чувствительны к токсическим влияниям ртути и содержащим ее препаратам, поскольку их организм не способен эффективно выводить эти токсические вещества [Haley, 2005]. При этом мужские половые гормоны увеличивают восприимчивость к нейротоксичности ртути, а женские обеспечивают хорошую степень защиты. Для норок

отмечена высокая внутривидовая вариабельность накопления токсиканта – его уровень во всех органах был выше у пастелевых норок, чем у серебристо-голубых (рис. 2). Внутривидовые различия по способности накапливать даже эссенциальные микроэлементы отмечаются практически у всех пушных животных [Плотников и др., 2008]. По всей видимости, генотипические различия в концентрации ртути связаны и с неодинаковой интенсивностью метаболизма у норок разных генотипов [Ильина и др., 2007].

В органах всех видов, разводимых в неволе, отмечены концентрации ртути более низкие, чем в природных популяциях [Evans et al., 2000; Комов, 2010], и значительно ниже тех, которые вызывают токсические эффекты. Так, для норки и выдры содержание ртути в мозге, превышающее 10 мг/кг, и в печени в пределах 20–100 мг/кг несовместимо с жизнью [Dansereau et al., 1999]. У лисиц острый токсикоз с летальным исходом наблюдался при содержании ртути в печени и почках на уровне 30 мг/кг [Borg et al., 1969].

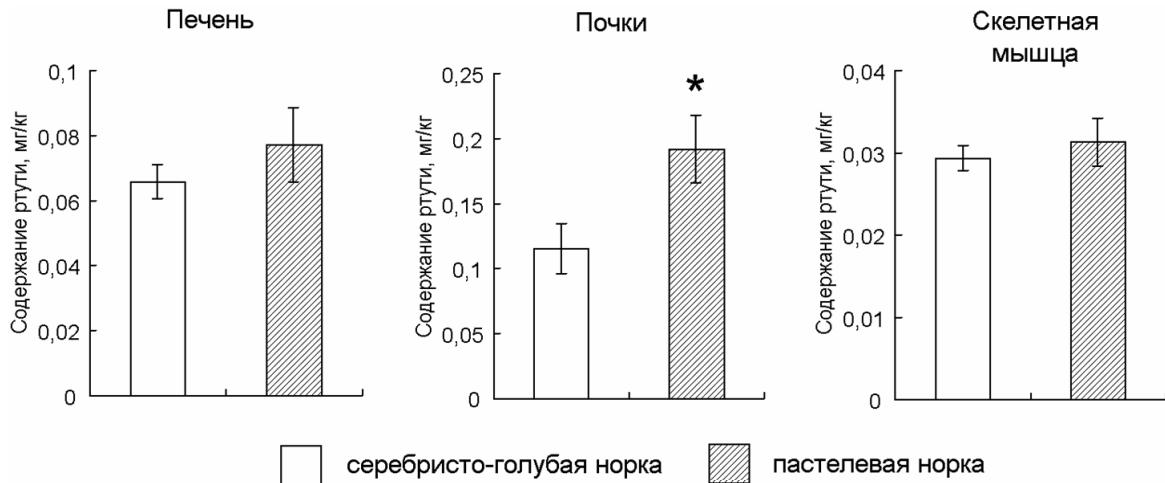


Рис. 2. Содержание ртути в органах норок разных окрасов (M ± m)

\* – различия достоверны по сравнению с серебристо-голубой норкой (p < 0,05)

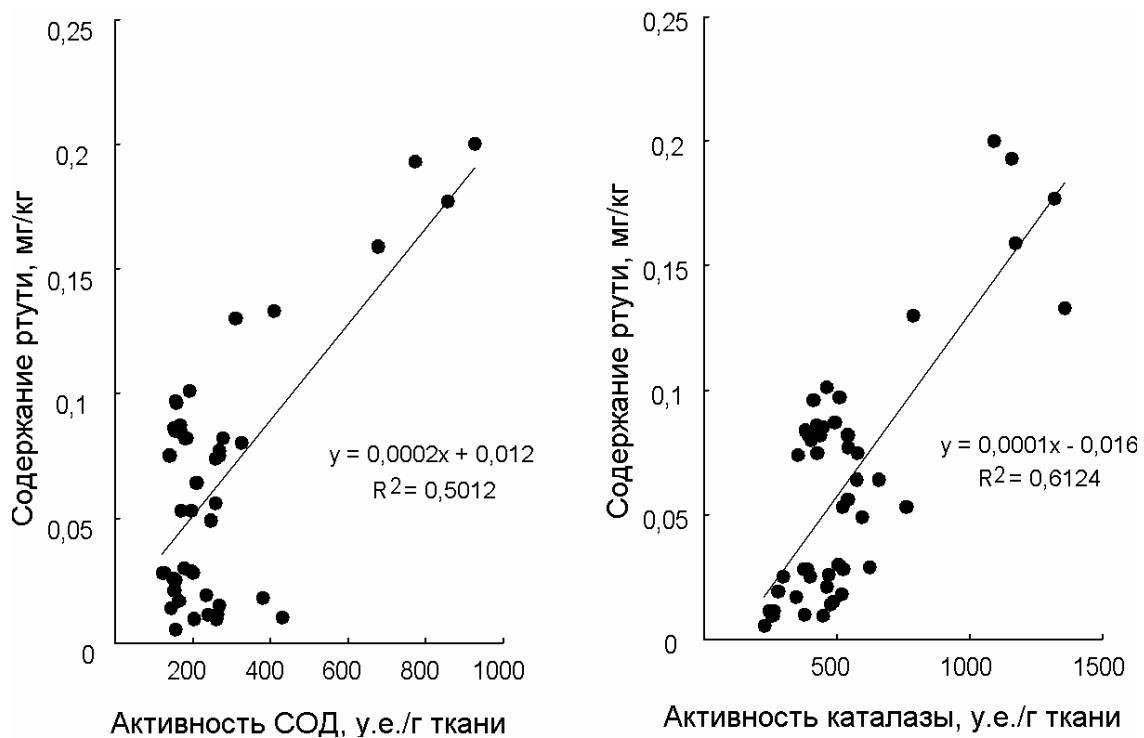


Рис. 3. Зависимость между активностью АОФ и содержанием ртути в печени у исследованных млекопитающих

Токсические эффекты ртути связаны со способностью метилртути связываться 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 показало, что при наблюдаемых концентрациях поллютанта не происходит их существенного изменения. Не было обнаружено зависимости между содержанием ртути и количеством витаминов Е и А, что свидетельствует об отсутствии существенной нагрузки на антиоксидантную систему животных. Отмечена прямая корреляционная зависимость между уровнем ртути и содержанием небелковых SH-групп в почках (рис. 4). Это, очевидно, связано с тем, что для выведения из организма вначале должен образоваться комплекс ртути с глутатионом, который затем выделяется из клеток в кровь и в дальнейшем с участием печени выводится из организма. Установлено, что при низких концентрациях ртути в органе (до 0,15 мг/кг ткани) количество небелковых SH-групп, с которыми может связаться металл для последующего выведения, возрастает параллельно с увеличением концентрации поллютанта (рис. 4). При дальнейшем увеличении его концентрации организм не способен обеспечить достаточное количество соединений с сульфгидрильными группами, чтобы эффективно выводить ртуть из организма.

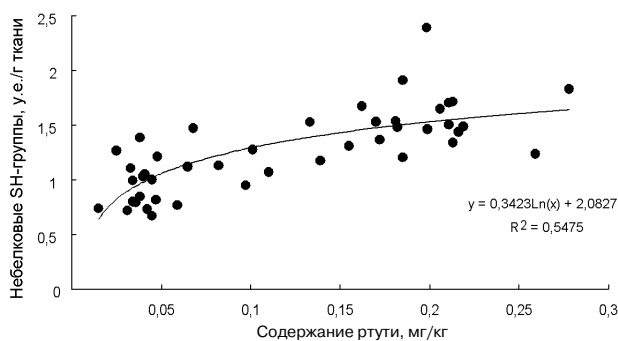


Рис. 4. Зависимость между уровнем небелковых SH-групп и содержанием ртути в почках у исследованных млекопитающих

## Заключение

Таким образом, накопление ртути у разводимых в неволе хищных млекопитающих зависело от экологических особенностей вида (интенсивности клеточного и тканевого метаболизма) и могло определяться кормовой базой исследованных животных. Генотипические

особенности животных также отражаются на способности накапливать соединения ртути. При достаточно низком содержании ртути в органах зверей, разводимых в неволе, по сравнению с дикими животными, существенных нарушений в работе антиоксидантной системы выявлено не было. Обнаруженные изменения уровня небелковых сульфгидрильных групп были направлены на детоксикацию ртути и ее соединений.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ НШ-3731.2010.4, НШ-1642.2012.4 и ФЦП ГК № 02.740.11.0700.

## Литература

- Зенков Н. К., Ланкин В. З., Меньщикова Е. Б. Окислительный стресс: Биохимический и патофизиологический аспекты. М.: МАИК Наука/Интерпериодика, 2001. 343 с.
- Ильина Т. Н., Илюха В. А., Калинина С. Н. и др. Влияние генотипа на сезонные изменения антиоксидантной системы и изоферментного спектра лактатдегидрогеназы американских норок (*Mustela vison* Schreber 1777) // Вестник ВОГиС. 2007. Т. 11, № 1. С. 145–154.
- Комов В. Т. Содержание ртути в органах и тканях рыб, птиц и млекопитающих европейской части России // Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты: Материалы Междунар. симпоз. (Москва, 7–9 сент. 2010 г.). М., 2000. С. 14–19.
- Коросов А. В., Горбач В. В. Компьютерная обработка биологических данных: Метод. пособие. Петрозаводск: ПетрГУ, 2007. 76 с.
- Медведев Н. В., Ивантер Э. В. Экологическая токсикология природных популяций птиц и млекопитающих Севера. М.: Наука, 2007. 229 с.
- Немова Н. Н. Биохимическая адаптация накопления ртути у рыб. М.: Наука, 2005. 164 с.
- Плотников И. А., Орлов П. П., Федосеева Г. А. Микроэлементная обеспеченность клеточных степных сурков (*Marmota bobak*) в сравнении с дикими // Вопросы физиологии, содержания, кормопроизводства и кормления, селекции с.-х. животных, биологии пушных зверей и птиц, охотоведения: Материалы междунар. науч.-практ. конф. Киров, 2008. С. 281–286.
- 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.
- Этическая экспертиза биомедицинских исследований. Практические рекомендации / Ред. Ю. Б. Белоусова. М., 2005. 156 с.
- Basu N., Scheuhammer A. M., Bursian S. J. et al. Mink as a sentinel species in environmental health // Environ Res. 2007. Vol. 103, N 1. P. 130–144.
- Bears R. F., Sizer I. N. A spectral method for measuring the breakdown of hydrogen peroxide

by catalase // J. Biol. Chem. 1952. Vol. 195, N 1. P. 133–140.

*Borg K., Wanntorp H., Erne K., Hanko E.* Alkyl mercury poisoning in terrestrial Swedish wildlife // *Viltrevy*. 1969. Vol. 6. P. 301–379.

*Casey T. M., Withers P. C., Casey K. K.* Metabolic and respiratory responses of arctic mammals to ambient temperature during the summer // *Comp. Biochem. Physiol.* 1979. Vol. 64A, N 2. P. 331–341.

*Dansereau M., Lariviere N., Tremblay D. D., Belanger D.* Reproductive performance of two generations of female semidomesticated mink fed diets containing organic mercury contaminated freshwater fish // *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 1999. Vol. 36. P. 221–226.

*Evans R. D., Addison E. M., Villeneuve J. Y. et al.* Distribution of inorganic and methylmercury among tissues in mink (*Mustela vison*) and otter (*Lutra canadensis*) // *Environ Res.* 2000. Vol. 84, N 2. P. 133–139.

*Facemire C., Augspurger T., Bateman D. et al.* Impacts of mercury contamination in the southeastern United States // *Water Air Soil Pollut.* 1995. Vol. 80. P. 923–926.

*Grigal D. F.* Mercury Sequestration in Forests and Peatlands: A Review // *J. Environ. Qual.* 2003. Vol. 32. P. 393–405.

*Haley B. E.* Mercury toxicity: Genetic susceptibility and synergistic effects // *Medical Veritas*. 2005. Vol. 2. P. 535–542.

*James S. J., Cutler P., Melnyk S. et al.* Metabolic biomarkers of increased oxidative stress and impaired methylation capacity in children with autism // *Am. J. Clin. Nutr.* 2004. Vol. 80. P. 1611–1617.

*Lund B. O., Miller D. M.* Studies in Hg-induced H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> production and lipid peroxidation in vitro in rat kidney mitochondria // *Biochem. Pharmacol.* 1993. Vol. 45. P. 2017–2024.

*Misra H. H., Fridovich I.* The role of superoxide anion in the autoxidation of epinephrine and a simple assay for superoxide dismutase // *J. Biol. Chem.* 1972. Vol. 247. P. 3170–3175.

*Mozaffarian D., Rimm E. B.* Fish intake, contaminants, and human health evaluating the risks and the benefits // *JAMA*. 2006. Vol. 296, N 15. P. 1885–1899.

*Scheuhammer A., Meyer M., Sandheinrich M., Murray M.* Effects of environmental methylmercury on the health of wild birds, mammals, and fish // *Ambio*. 2007. Vol. 36, N 1. P. 12–18.

*Sedlak J., Lindsay R.H.* Estimation of total, protein-bound and non-protein sulfhydryl groups in tissue with Ellman's reagent // *Anal. Biochem.* 1968. Vol. 25. P. 192–205.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

##### **Хижкин Евгений Александрович**

младший научный сотрудник  
Институт биологии Карельского научного центра РАН  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: hizhkin84@mail.ru  
тел.: (8142) 573107

##### **Илюха Виктор Александрович**

зав. лаб. экологической физиологии животных, д. б. н.  
Институт биологии Карельского научного центра РАН  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: ilyukha@bio.krc.karelia.ru  
тел.: (8142) 573107

##### **Комов Виктор Трофимович**

зам. директора, д. б. н.  
ИБВВ им. И. Д. Папанова  
Ярославская обл., Некоузский р-н, п. Борок,  
Россия, 152742  
эл. почта: vkomov@ibiw.yaroslavl.ru

##### **Паркалов Иван Владимирович**

председатель совета директоров  
ООО «Северная пушнина»  
ул. Финляндская, 19, г. Санкт-Петербург, Колпино, Россия  
эл. почта: parkalov@nordfurs.ru

##### **Ильина Татьяна Николаевна**

старший научный сотрудник, к. б. н.  
Институт биологии Карельского научного центра РАН  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: ilyina@bio.krc.karelia.ru  
тел.: (8142) 573107

##### **Khizhkin, Evgeniy**

Institute of Biology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: hizhkin84@mail.ru  
tel.: (8142) 573107

##### **Ilyukha, Viktor**

Institute of Biology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: ilyukha@bio.krc.karelia.ru  
tel.: (8142) 573107

##### **Komov, Victor**

Institute of Inland Waters Biology,  
Russian Academy of Sciences  
152742 Borok, Nekouzskiy District, Jaroslavl Region,  
Russia  
e-mail: vkomov@ibiw.yaroslavl.ru

##### **Parkalov, Ivan**

LLC «North furs»  
19 Finlyandskaya St., Kolpino, St. Petersburg, Russia  
e-mail: parkalov@nordfurs.ru

##### **Ilyina, Tatyana**

Institute of Biology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: ilyina@bio.krc.karelia.ru  
tel.: (8142) 573107

**Баишникова Ирина Валерьевна**

ведущий биолог  
Институт биологии Карельского научного центра РАН  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: iravbai@mail.ru  
тел.: (8142) 573107

**Сергина Светлана Николаевна**

научный сотрудник  
Институт биологии Карельского научного центра РАН  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: cvetnick@yandex.ru  
тел.: (8142) 573107

**Гремячих Вера Алексеевна**

старший научный сотрудник  
ИБВВ им. И. Д. Папанина  
Ярославская обл., Некоузский р-н, п. Борок,  
Россия, 152742  
эл. почта: grva@ibiw.yaroslavl.ru

**Камшилова Татьяна Борисовна**

младший научный сотрудник  
ИБВВ им. И. Д. Папанина  
Ярославская обл., Некоузский р-н, п. Борок,  
Россия, 152742  
эл. почта: ktb@ibiw.yaroslavl.ru

**Степина Елена Сергеевна**

аспирант  
ИБВВ им. И. Д. Папанина  
Ярославская обл., Некоузский р-н, п. Борок,  
Россия, 152742

**Baishnikova, Irina**

Institute of Biology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: iravbai@mail.ru  
tel.: (8142) 573107

**Sergina Svetlana**

Institute of Biology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: cvetnick@yandex.ru  
tel.: (8142) 573107

**Gremyachikh, Vera**

Institute of Inland Waters Biology,  
Russian Academy of Sciences  
152742 Borok, Nekouzskiy District, Jaroslavl Region,  
Russia  
e-mail: grva@ibiw.yaroslavl.ru

**Kamshilova, Tatyana**

Institute of Inland Waters Biology,  
Russian Academy of Sciences  
152742 Borok, Nekouzskiy District, Jaroslavl Region,  
Russia  
e-mail: ktb@ibiw.yaroslavl.ru

**Stepina, Elena**

Institute of Inland Waters Biology,  
Russian Academy of Sciences  
152742 Borok, Nekouzskiy District, Jaroslavl Region,  
Russia