



DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-251219>

EDN: <https://elibrary.ru/rxhhqb>

УДК 546.49:599(470.22)

Научная статья

Ртуть в организме млекопитающих Республики Карелия (Россия)

С.Н. Калинина^{1*} , В.А. Илюха² , И.А. Зайцева¹ ,
В.Т. Комов² , Т.Б. Камшилова² , А.Е. Якимова¹ ,
Д.В. Панченко¹ , К.Ф. Тирронен¹ 

¹ Институт биологии Карельского научного центра РАН, 185035, Россия, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11

² Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, 152742, Россия, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, д. 109

*cvetnick@yandex.ru

Аннотация. В ходе работы проанализированы концентрации ртути (Hg) у млекопитающих с разной эколого-трофической специализацией, обитающих в Республике Карелия. Объектами служили 18 видов из отрядов Carnivora, Artiodactyla, Eulipotyphla и Rodentia. Содержание общей Hg в печени, почке и скелетной мышце животных определяли методом прямого пиролитического разложения с атомно-абсорбционной детекцией. Выявленные особенности уровня Hg у исследованных животных согласовывались с хорошо известными закономерностями распределения металла как между органами у отдельных видов, так и в пределах уровня консументов в пищевых цепях. Почти у всех видов животных содержание Hg было максимальным в почке, реже в печени. Вне зависимости от образа жизни (наземного или полуводного) консументы второго порядка (плотоядные виды) характеризовались более высоким содержанием Hg в организме по сравнению с консументами первого порядка (питающимися преимущественно растительной пищей). Концентрации Hg в организме животных Карелии в основном не достигали летальных значений и не превышали норм, зафиксированных для тех же или таксономически близких видов из других регионов России и стран мира. Результаты исследования свидетельствуют об относительно низком уровне Hg в организме млекопитающих наземных и полуводных экосистем Карелии.

Ключевые слова: метилртуть, Европейский север России, эколого-трофические группы, хищные, всеядные, растительноядные, токсичность, наземные и полуводные экосистемы, печень, почка, скелетные мышцы

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственных заданий КарНЦ РАН (FMEN-2022-0003) и ИБВВ (№124032500016-4).

ORCID:

С.Н. Калинина, <https://orcid.org/0000-0003-1906-092X>

В.А. Илюха, <https://orcid.org/0000-0002-7085-4154>

И.А. Зайцева, <https://orcid.org/0000-0002-6277-009X>
В.Т. Комов, <https://orcid.org/0000-0001-9124-7428>
Т.Б. Камшилова, <https://orcid.org/0000-0002-8535-9658>
А.Е. Якимова, <https://orcid.org/0000-0001-9196-1808>
Д.В. Панченко, <https://orcid.org/0000-0003-1955-4196>
К.Ф. Тирронен, <https://orcid.org/0000-0002-8208-5460>

Для цитирования: Калинина, С.Н. и др., 2026. Ртуть в организме млекопитающих Республики Карелия (Россия). *Трансформация экосистем* 9 (3), 5–25. <https://doi.org/10.23859/estr-251219>

Поступила в редакцию: 19.12.2025

Принята к печати: 28.01.2026

Опубликована онлайн: 31.07.2026

DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-251219>

EDN: <https://elibrary.ru/rxhhqb>

UDC 546.49:599(470.22)

Article

Mercury in the body of mammals of the Republic of Karelia (Russia)

S.N. Kalinina^{1*}, V.A. Ilyukha², I.A. Zaitseva¹,
V.T. Komov², T.B. Kamshilova², A.E. Yakimova¹,
D.V. Panchenko¹, K.F. Tirronen¹

¹ *Institute of Biology, Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Pushkinskaya St. 11, Petrozavodsk, 185035 Russia*

² *I.D. Papanin Institute of Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, Borok 109, Nekouzsky District, Yaroslavl Oblast, 152742 Russia*

*cvetnick@yandex.ru

Abstract. The study analyzed mercury (Hg) concentrations in mammals with different ecological and trophic specializations living in the Republic of Karelia. The subjects of this study comprised 18 species from the orders Carnivora, Artiodactyla, Eulipotyphla, and Rodentia. The total Hg content in the liver, kidney, and skeletal muscle of the animals was determined by direct pyrolytic decomposition with atomic absorption detection. The identified features of Hg levels in the studied animals were consistent with well-known patterns of metal distribution both between organs in individual species and within the level of consumers in food chains. In the majority of animal species examined, the kidneys were found to contain the highest concentrations of Hg, with the liver exhibiting a lower but still significant level of accumulation. Notwithstanding the subject's lifestyle (terrestrial or semi-aquatic), second-order consumers (carnivorous species) were distinguished by elevated Hg levels in the body in comparison to first-order consumers (species that primarily consume plant-based foods). The concentrations of Hg in the bodies of animals in Karelia did not generally reach lethal levels and did not exceed the established norms for the same or taxonomically closely related species from other regions of Russia and countries around the world. The findings of the study suggest that the level of Hg in the bodies of mammals inhabiting terrestrial and semi-aquatic ecosystems in Karelia is relatively low.

Keywords: methylmercury, European North of Russia, trophic groups, predators, omnivores, herbivores, toxicity, terrestrial and semi-aquatic ecosystems, liver, kidney, skeletal muscles

Funding. The study was performed under state orders (projects FMEN-2022-0003 and no. 124032500016-4).

ORCID:

S.N. Kalinina, <https://orcid.org/0000-0003-1906-092X>

V.A. Ilyukha, <https://orcid.org/0000-0002-7085-4154>

I.A. Zaitseva, <https://orcid.org/0000-0002-6277-009X>

V.T. Komov, <https://orcid.org/0000-0001-9124-7428>

T.B. Kamshilova, <https://orcid.org/0000-0002-8535-9658>

A.E. Yakimova, <https://orcid.org/0000-0001-9196-1808>

D.V. Panchenko, <https://orcid.org/0000-0003-1955-4196>

K.F. Tirronen, <https://orcid.org/0000-0002-8208-5460>

To cite this article: Kalinina, S.N. et al., 2026. Mercury in the body of mammals of the Republic of Karelia (Russia). *Ecosystem Transformation* 9 (3), 5–25. <https://doi.org/10.23859/estr-251219>

Received: 19.12.2025

Accepted: 28.01.2026

Published online: 31.07.2026

Введение

В связи с высокой токсичностью, способностью к переносу на большие расстояния, биоаккумуляции и биомagniфикации ртуть (Hg) представляет особую опасность для человека и животных абсолютно всех экосистем (Kalisińska, 2019; WHO, 2017¹). Металл попадает в окружающую среду в результате естественных процессов (вулканической деятельности, выветривания горных пород, лесных пожаров и т.д.), а также деятельности человека (сжигания угля и отходов, очистки и производства металлов, хлора и щелочей, применения отдельных гербицидов и пестицидов). Далее ртуть транспортируется и перераспределяется между основными компонентами окружающей среды (воздухом, почвой и водой), пока не будет удалена из системы путем залегания в прибрежных и глубоководных океанических и озерных отложениях и подземных почвах (Gworek et al., 2020). В биологических системах Hg существует в различных формах, включая элементарную (Hg^0), неорганические соединения (Hg^+ и Hg^{2+}), а также органические соединения ($R-Hg^+$ или $R-Hg-R$, где R представляет собой органический лиганд).

Ртуть поступает в организм животных и человека с пищей, при дыхании, а также через кожу и аккумулируется преимущественно в почках, печени и ЦНС (Dahmardeh Behrooz et al., 2022; Kalisińska, 2019; WHO, 2017¹). У человека, птиц и млекопитающих повышенные уровни метилированной ртути (CH_3Hg , $MeHg$) приводят к нарушениям двигательных функций, функции нервной, гормональной и выделительной систем, снижению репродуктивной способности и гибели (Scheuhammer et al., 2015; Wolfe et al., 2007). Токсическое действие металлов (в том числе и Hg) при хроническом воздействии включает в себя нарушение структуры мембран, инактивацию ферментов, повреждение ДНК, то есть во многом аналогично окислительному стрессу, индуцированному активными формами кислорода (Ding et al., 2022; Isaksson, 2010).

Поскольку водные экосистемы являются важным компонентом глобального биогеохимического цикла ртути, хорошо изучены происходящие в них метилирование и биомagniфикация этого металла (Lavoie et al., 2013). Трансформация неорганической Hg анаэробными микроорганизмами донных отложений приводит к образованию $MeHg$, которая последовательно аккумулируется на разных уровнях пищевой цепи (Zillioux et al., 1993). Предыдущие исследования продемон-

¹ WHO, 2017. Ten chemicals of major health concern. Интернет-ресурс. URL: http://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/chemicals_phc/en/index.html (дата обращения: 18.12.2025).

стрировали тенденцию к увеличению концентрации Hg от продуцентов к первичным консументам и вторичным консументам (Безель и др., 1994; Полещук и др., 2025; Giebichenstein et al., 2025; Kalisińska, 2019). Таким образом, ртуть достигает самых высоких уровней в организме хищных рыб, рыбоядных птиц, а также морских и полуводных млекопитающих (Kalisińska, 2019; Lavoie et al., 2013). В наземных экосистемах также происходит биомагнификация MeHg, однако это явление изучено гораздо меньше (Chételat et al., 2020). Дикие животные наземных экосистем, скорее всего, испытывают хроническое воздействие низких доз Hg, содержащейся в пище, воде и окружающем воздухе (Kalisińska, 2019), что может повлиять на функционирование физиологически важных нейрорхимических систем, рост и репродукцию (Scheuhammer et al., 2015; Wolfe et al., 2007).

Республика Карелия (РК) – это один из субъектов Российской Федерации, находящийся в Северо-Западном федеральном округе. При изучении накопления Hg в основных естественных природных и урбанизированных средах Карелии (Горбунов и др., 2019) выявлено, что уровни этого металла в почве, водной растительности и донных отложениях в исследованных районах не превышают принятых в России нормативов и близки к фоновым. Согласно Государственному докладу о состоянии окружающей среды РК, за последние годы воздействия антропогенной Hg на природную среду Карелии не зафиксировано². Однако РК является республикой с очень высоким коэффициентом озерности; поверхностным водам Карелии свойственна повышенная acidификация и гумификация, способствующие увеличению подвижности и биодоступности Hg в пищевых цепях (Горбунов и др., 2019; Литвиненко и др., 2011). Учитывая все вышесказанное, необходимо повсеместно проводить исследования накопления Hg в различных экосистемах.

Цель работы состояла в оценке концентрации Hg у 18 видов млекопитающих с разной эколого-трофической специализацией, обитающих в РК. В выборку были включены плотоядные, всеядные и растительноядные животные, ведущие наземный и около/полуводный образ жизни.

Материалы и методы

Объектами служили представители отрядов Carnivora (*Canis lupus* L., 1758; *Lutra lutra* L., 1758; *Lynx lynx* L., 1758; *Martes martes* L., 1758; *Mustela nivalis* L., 1766; *Neogale vison* Schreber, 1777; *Nyctereutes procyonoides* Grey, 1834; *Ursus arctos* L., 1758), Artiodactyla (*Alces alces* L., 1758, *Cervus elaphus* L., 1758; *Sus scrofa* L., 1758), Eulipotyphla (*Neomys fodiens* Pennant, 1771; *Talpa europaea* L., 1758) и Rodentia (*Arvicola amphibious* L., 1758; *Castor fiber* L., 1758; *Agricola (Microtus) agrestis* L., 1761; *Ondatra zibethicus* L., 1766; *Sicista betulina* Pallas, 1779). Номенклатура видов приведена по А.А. Лисовскому и др. (2019).

В период с 2009 по 2024 гг биоматериал (печень, почка, скелетные мышцы) собирали у животных, добытых в рамках других исследований или погибших по иным причинам, например, в результате дорожно-транспортных происшествий (как в случае с *L. lutra*, *L. lynx*, *M. nivalis*, *N. vison*, *N. procyonoides*).

Содержание общей Hg в печени, почке и скелетной мышце животных определяли методом пиролиза на атомно-абсорбционном спектрометре РА-915М с приставкой ПИРО («Люмэкс», г. Санкт-Петербург) (Назаренко и др., 1986). Точность аналитических методов измерения контролировали с использованием сертифицированного биологического материала DORM-4 и DOLT-5 (Институт химии окружающей среды, Оттава, Канада). Концентрацию ртути представляли в мкг/г сырой массы ткани.

Полученные данные обрабатывали общепринятыми методами статистики в программах MS Excel 2019 и STATGRAPHICS Centurion XIX (USA). Выборки имели распределение, отличающееся от нормального, поэтому данные представляли в виде медиан, а также нижнего и верхнего квартилей (Me [Q1; Q3]); кроме того, приводили минимальное и максимальное значения. Возраст и пол животных не учитывался при проведении статистической обработки, поскольку не во всех случаях эти характеристики были известны. Для оценки различий между эколого-трофическими группами использовали критерий Краскела–Уоллиса (Kruskal–Wallis *H*-test, непараметрический дисперсионный анализ). Для выявления взаимосвязей, а также оценки их силы и направленности использовали корреляционный анализ (ранговый критерий Спирмена). Статистически значимыми считали различия при $p < 0.05$.

² Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2024 г., 2025.

Результаты

Почти у всех исследованных видов животных содержание Hg было максимальным в почке, реже в печени. Исключениями явились: *N. vison*, у которой концентрации металла были практически на одном уровне во всех исследованных тканях, а также *C. fiber* и *C. elaphus*, у которых уровень Hg был самым высоким в мышцах по сравнению с печенью и почкой ($p < 0.05$) (Табл. 1).

В ходе корреляционного анализа были обнаружены взаимосвязи между уровнями ртути во внутренних органах некоторых видов животных ($p < 0.05$) (Табл. 2). У *S. scrofa* и *S. betulina* отмечены сильные корреляции между концентрациями ртути в печени и почках, у *T. europaeae* – между значениями показателя в почках и мышце, тогда как у *O. zibethicus* наблюдались взаимосвязи средней силы во всех исследуемых случаях.

Анализ взаимосвязей между концентрацией Hg во внутренних органах и эколого-трофической специализацией животных показал (Рис. 1), что среди наземных видов уровень металла снижался в ряду плотоядные – всеядные – растительноядные; среди полуводных видов плотоядные также характеризовались более высокими значениями показателя по сравнению с всеядными и фитофагами. Содержание Hg у наземных всеядных видов было выше, чем у околотовных всеядных. В организме наземных фитофагов выявлен более высокий уровень Hg в почках по сравнению с полуводными растительноядными и околотовными всеядными видами.

Обсуждение результатов

В ходе работы была проведена оценка особенностей накопления Hg у 18 видов млекопитающих РК с разной эколого-трофической специализацией (растительноядные, плотоядные и всеядные животные, ведущие наземный и около/полуводный образ жизни). Полученные нами результаты хорошо согласуются с мнением других исследователей (Безель и др., 1994; Chételat et al., 2020; Kalisińska, 2019) и могут быть объяснены несколькими факторами, влияющими на аккумуляцию Hg у млекопитающих. Уровень Hg в организме диких животных напрямую зависит от сочетанного воздействия экологических и физиологических процессов: первые связаны с поступлением Hg с пищей, вторые регулируют усвоение, трансформацию и выведение этого токсиканта.

Тканеспецифичность распределения Hg в организме млекопитающих Карелии

Ртуть аккумулируется во многих органах животных, особенно в тканях, богатых белком (Shore et al., 2011). Причиной тому является высокое сродство неорганических и органических форм Hg к SH-группам в составе аминокислот, а также основного внутриклеточного небелкового тиола – глутатиона (GSH) (de Lima Lemes, 2010). Разные типы тканей демонстрируют различные аспекты воздействия Hg на животных: важно учитывать инертность/физиологическую активность ткани, а также ее роль в метаболизме токсиканта (депонирование, преобразование, экскреция) (Chételat et al., 2020). В метаболически инертных тканях (перья, волосы, вибриссы, когти, чешуя и т.п.) во время их роста MeHg образует комплекс с кератином, который дает информацию о биоаккумуляции Hg в течение дискретных периодов времени (Vo et al., 2011). Концентрации металла в метаболически активных тканях (мышцы, печень, почки, мозг и кровь) позволяют оценить относительно недавнее воздействие Hg на организм, а также связать эти концентрации с потенциальным риском для здоровья (Scheuhammer and Sandheinrich, 2008).

Уровни Hg у млекопитающих, как правило, максимальны в печени и почках, далее в мышцах и, наконец, в мозге (Dahmardeh Behrooz et al., 2022; Kalisińska, 2019; WHO, 2017³). В нашем исследовании практически у всех видов животных концентрации металла снижались в ряду почка – печень – мышцы. Исключениями явились такие виды, как *N. vison*, у которой концентрации металла были высокими практически на одном уровне во всех исследованных тканях, а также *C. fiber* и *C. elaphus*, у которых уровень Hg был максимальным в мышцах.

Детоксицирующие Hg органы – печень и почки – ответственны за синтез металлотионеинов, важных белков, связывающих токсикант. Помимо этого, в печени происходят процессы деметилирования MeHg, тогда как почки обладают высоким сродством к неорганической Hg, которая может накапливаться в органе и в дальнейшем экскретироваться (период полувыведения составляет

³ WHO, 2017. Ten chemicals of major health concern. Интернет-ресурс. URL: http://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/chemicals_phc/en/index.html (дата обращения: 18.12.2025).

Табл. 1. Концентрация Hg (мкг/г сырой ткани) у млекопитающих разных эколого-трофических групп (медиана [Q1; Q3]; min–max). Условные обозначения: Terr-Herb – наземные растительноядные, SemiAq-Herb – полуводные растительноядные, Terr-Omn – наземные всеядные, SemiAq-Omn – околоводные всеядные, Terr-Carn – наземные плотоядные, SemiAq-Carn – полуводные плотоядные животные.

Эколого-трофическая группа	Вид	n	Органы и ткани		
			печень	почка	скелетная мышца
Terr-Herb	<i>Alces alces</i> Лось	41	0.001 [0.001; 0.004]; 0–0.013	0.038 [0.028; 0.065]; 0.012–0.167	0.0008 [0.0003; 0.001]; 0–0.004
	<i>Cervus elaphus</i> Олень благородный, марал	6	0 [0; 0]; 0–0.001	0.0002 [0; 0.0003]; 0–0.0007	0.0003 [0; 0.0003]; 0–0.0007
	<i>Agricola agrestis</i> Полёвка тёмная (пашенная)	2	0.014 [0.007; 0.022]; 0.007–0.022	0.084 [0.009; 0.159]; 0.009–0.159	0.006 [0.002; 0.009]; 0.002–0.009
SemiAq-Herb	<i>Castor fiber</i> Бобр обыкновенный	1	0.005	0.002	0.008
	<i>Ondatra zibethicus</i> Ондатра	23	0.004 [0.001; 0.008]; 0.0002–0.027	0.007 [0.005; 0.012]; 0.001–0.093	0.002 [0.001; 0.003]; 0.0002–0.019
Terr-Omn	<i>Martes martes</i> Куница лесная	5	0.322 [0.319; 0.647]; 0.309–0.695	0.766 [0.649; 0.884]; 0.547–1.529	0.478 [0.305; 0.569]; 0.242–0.919
	<i>Ursus arctos</i> Медведь бурый	3	0.089 [0.046; 0.153]; 0.046–0.153	0.200 [0.083; 0.264]; 0.083–0.264	0.005 [0; 0.010]; 0–0.030
	<i>Sus scrofa</i> Кабан	71	0.011 [0.005; 0.021]; 0–0.160	0.048 [0.038; 0.099]; 0–0.273	0.002 [0.0003; 0.008]; 0–0.032
	<i>Sicista betulina</i> Мышовка лесная	8	0.004 [0.003; 0.006]; 0.001–0.012	0.010 [0.004; 0.020]; 0.003–0.021	0.005 [0.004; 0.008]; 0.001–0.048
SemiAq-Omn	<i>Nyctereutes procyonoides</i> Собака енотовидная	1	0.261	0.294	0.094
	<i>Arvicola amphibious</i> Полёвка водяная	12	0.002 [0.001; 0.004]; 0.0002–0.005	0.003 [0.002; 0.006]; 0.001–0.026	0.0009 [0.0005; 0.0021]; 0.0002–0.0044
Terr-Carn	<i>Canis lupus</i> Волк	2	0.146 [0.046; 0.245]; 0.046–0.245	0.153 [0.094; 0.213]; 0.094–0.213	0.014 [0.011; 0.016]; 0.011–0.016
	<i>Lynx lynx</i> Рысь обыкновенная	1	0.085	0.086	0.068
	<i>Mustela nivalis</i> Ласка	1	0.102	0.136	0.061
	<i>Talpa europaea</i> Крот европейский	6	0.059 [0.055; 0.080]; 0.042–0.175	0.140 [0.097; 0.163]; 0.086–0.478	0.030 [0.026; 0.046]; 0.020–0.170
SemiAq-Carn	<i>Lutra lutra</i> Выдра речная	1	3.730	1.425	1.5
	<i>Neogale vison</i> Норка американская	3	4.064 [0.728; 22.75]; 0.728–22.75	4.167 [0.876; 16.35]; 0.876–16.35	4.749 [0.437; 8.515]; 0.437–8.515
	<i>Neomys fodiens</i> Кутора обыкновенная	18	0.189 [0.145; 0.474]; 0.094–6.2	0.328 [0.260; 0.446]; 0.158–0.513	0.182 [0.113; 0.531]; 0.068–3.845

Табл. 2. Коэффициенты (r) ранговой корреляции Спирмена, отражающие силу взаимосвязей между уровнями Hg во внутренних органах животных. Условные обозначения: * – $p < 0.05$, ** – $p < 0.01$, прочерк – анализ не проводили, $\times$ – $p > 0.05$.

Вид	Органы и ткани		
	печень – почка	печень – мышца	почка – мышца
<i>S. scrofa</i>	0.81**	$\times$	$\times$
<i>T. europaeae</i>	$\times$	$\times$	0.94*
<i>O. zibethicus</i>	0.66*	0.60*	0.62*
<i>S. betulina</i>	0.89*	–	–

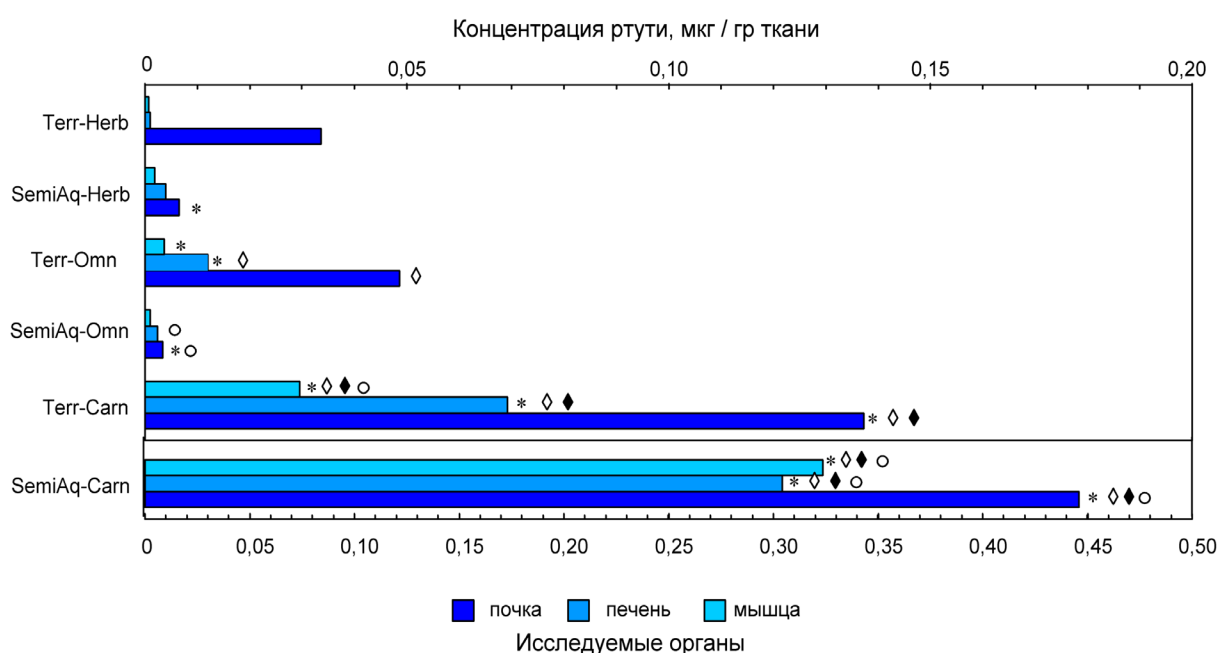


Рис. 1. Медианы концентрации Hg у животных разных эколого-трофических групп.

Примечание: нижняя шкала относится к группе SemiAq-Carn, тогда как верхняя – к остальным группам животных.

Условные обозначения: Terr-Herb – наземные растительноядные, SemiAq-Herb – полуводные растительноядные, Terr-Omn – наземные всеядные, SemiAq-Omn – околотовные всеядные, Terr-Carn – наземные плотоядные, SemiAq-Carn – полуводные плотоядные животные.

Различия статистически значимы ($p < 0.05$) по сравнению с: * – Terr-Herb, ◇ – SemiAq-Herb, ○ – Terr-Omn, ◆ – SemiAq-Omn.

приблизительно 40 дней) (Gover, 1991). При поступлении низких доз Hg постоянное выведение почками может предотвратить ее накопление, однако при высоких дозах металла его аккумуляция превалирует над выведением (Eagles-Smith and Ackerman, 2009; Evans et al., 2016).

Хотя общая концентрация Hg в мышцах, как правило, ниже, чем в других тканях, они составляют более 40% массы тела млекопитающих и, таким образом, вносят наибольший пропорциональный вклад в содержание металла в целом организме. Мышечная ткань служит индикатором воздействия метилртути на организм, поскольку большая часть Hg в мышечной ткани представлена MeHg (Squadrone et al., 2015). Более того, концентрация MeHg в мышцах (и иногда и в печени) охотничьих животных, добытых с целью употребления в пищу, может представлять собой важный источник воздействия MeHg на человека.

В предыдущих исследованиях корреляционных связей между концентрациями ртути во внутренних органах млекопитающих получены противоречивые результаты: в одних регистрировались статистически значимые взаимосвязи (Dahmardeh Behrooz et al., 2022; Kalisińska, 2019), тог-

да как в других таковые не были обнаружены (Halbrook et al., 1994). Нами также был проведен корреляционный анализ (за исключением тех случаев, где это невозможно из-за малого размера выборки), и у некоторых видов животных были обнаружены взаимосвязи между уровнями Hg во внутренних органах.

Оценка влияния эколого-трофической специализации на концентрации Hg у млекопитающих Карелии

Поскольку пища является основным путем поступления Hg в организм диких животных (Chételat et al., 2020; WHO, 2017⁴), важную роль в интерпретации уровня токсиканта у того или иного вида играют его положение в трофической сети, среда обитания, доступность и качество пищи, а также использование пространства в сочетании с особенностями жизненного цикла (изменениями в питании в ходе онтогенеза или миграции) (Chételat et al., 2020).

Считается, что самым важным фактором, влияющим на накопление Hg у животных, является трофическое положение организма в экосистеме или длина пищевой цепи (Cabana and Rasmussen, 1994). Чем больше звеньев в этой сети, тем больше вероятность увеличения концентрации MeHg. Именно поэтому плотоядные животные зачастую имеют более высокие уровни ртути по сравнению с фитофагами, что было показано в нашей работе и подтверждается ранее проведенными исследованиями (Безель и др., 1994; Bedouet et al., 2025; Kalisińska, 2019).

Среда обитания также влияет на накопление Hg в организме животных. В толще воды происходит метилирование неорганической формы металла анаэробными микроорганизмами донных отложений, затем MeHg последовательно аккумулируется на разных трофических уровнях пищевой цепи (Lavoie et al., 2013). Поэтому организмы водных и, как в нашем случае, полуводных экосистем, как правило, аккумулируют больше Hg, чем животные наземных экосистем. Полуводные хищники, особенно рыбацкие, подвергаются гораздо более высокому риску накопления Hg в организме, чем типичные наземные плотоядные, питающиеся наземной добычей (Kalisińska, 2019), что и было подтверждено в нашем исследовании на млекопитающих РК.

Максимальные концентрации Hg среди изученных видов животных были зафиксированы у полуводных представителей семейства Mustelidae: *N. vison* и *L. lutra*. Основу питания *N. vison* составляют околотовные и водные животные (полевки, лягушки, раки, мелкая рыба и водные насекомые), тогда как *L. lutra* – типичный рыбацкий вид. Отмеченные нами уровни Hg в организме этих видов животных в большинстве случаев превышали значения токсиканта, зарегистрированные в предыдущих исследованиях на животных из других регионов России и стран мира (Комов и др., 2012; Dibbern et al., 2021; Lake et al., 2007; Lodenius et al., 2014; Wren et al., 1986), но не являлись токсичными для кунных (WVDL, 2015⁵).

Отдельные виды диких животных могут оставаться в пределах своих мест обитания, состоять в коротких пищевых цепях, но, несмотря на это, получать значительные концентрации Hg (Chételat et al., 2020). Это становится возможным, если их добыча перемещается из одного местообитания в другое, что особенно распространено в около/полуводных экосистемах, когда выходящие на поверхность водные насекомые становятся переносчиками MeHg, полученной из рек или озер, в наземную среду (Becker et al., 2018). В результате такие насекомоядные животные, как, например, *N. fodiens*, могут накапливать значительные концентрации Hg. Ранее был отмечен более высокий уровень Hg у некоторых наземных птиц, питавшихся хищными беспозвоночными (пауками), по сравнению с рыбацкими птицами (Cristol et al., 2008). Вероятно, по аналогии с морскими прибрежными экосистемами (McGrew et al., 2014; Noël et al., 2014), на территориях около пресноводных водоемов также происходят процессы переноса и аккумуляции MeHg водного происхождения в организме наземных животных. Особенности накопления Hg у насекомоядных крайне скудно освещены в доступной литературе (Иванова и др., 2023; Talmage and Walton, 1993). По сравнению с другими представителями отряда Eulipotyphla, концентрации токсиканта, выявленные нами в организме *N. fodiens*, были выше, чем у *Sorex araneus* (Иванова и др., 2023), но ниже, чем у *Blarina brevicauda* (Talmage and Walton, 1993).

⁴ WHO, 2017. Ten chemicals of major health concern. Интернет-ресурс. URL: http://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/chemicals_phc/en/index.html (дата обращения: 18.12.2025).

⁵ WVDL, 2015. Normal range values for WVDL Toxicology. Интернет-ресурс. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/read/52919318/normal-range-values-for-wvdl-toxicology> (дата обращения: 18.12.2025).

Другой исследованный нами представитель отряда Eulipotyphla – *T. europeae*, который ведет подземный образ жизни и питается в основном дождевыми червями, в меньшей степени – личинками жуков, многоножками, то есть организмами, находящимися в тесном контакте с почвой. Этот вид мы отнесли к группе наземных плотоядных. Зафиксированные нами уровни ртути в организме *T. europeae* были ниже, чем у животных того же вида из Финляндии и Челябинска (Россия) (Pankakoski et al., 1993; Samburova et al., 2021).

К группе наземных плотоядных животных, уровни ртути у которых были выше, чем у около- и полуводных животных, а также наземных фитофагов, относились такие виды, как *C. lupus*, *L. lynx* и *M. nivalis*. Это ярко выраженные хищники, основу питания которых составляют: у *C. lupus* – копытные, сурки, зайцы, барсуки, у *L. lynx* – заяц-беляк, мышевидные грызуны, иногда мелкие копытные и у *M. nivalis* – мелкие полевки. Концентрации Hg, отмеченные у этих видов животных Карелии, были сопоставимы с нормами для псовых, кошачьих и куньих соответственно⁶, а также с концентрациями металла у тех же видов животных из других регионов России и стран мира (Комов и др., 2012; Bedouet et al., 2025; Bilandžić et al., 2012; Gamberg and Braune, 1999; McGrew et al., 2014; Ottemo, 2009; Subotić et al., 2017; Vass et al., 2025).

Всеядные наземные животные (*M. martes*, *U. arctos*, *S. scrofa* и *S. betulina*) характеризовались более высоким уровнем Hg по сравнению с всеядными околоводными (*N. procyonoides* и *A. amphibious*) и с растительноядными организмами. Разнообразие в источниках питания наземных всеядных животных может способствовать значительному накоплению токсиканта в их организме. *M. martes* потребляет грызунов, насекомых, амфибий, ягоды и падаль. Основу питания *U. arctos* составляет растительная пища (сочные зеленые части растений, плоды, корневища), но в рацион также могут быть включены насекомые, рыба и падаль в осенний период наживровки. Питание *S. scrofa* достаточно разнообразно: круглый год кабан потребляет подземные части растений (корневища, корни, клубни, луковицы растений), сезонно – плоды, орехи, ягоды и семена, а также вегетативные надземные части растений и животные корма (черви, моллюски, насекомые и их личинки, мелкие позвоночные, падаль). *S. betulina* питается животной (мелкие беспозвоночные) и растительной (цветы, семена) пищей. *A. amphibious* селится вдоль берегов, питается сочными растительными кормами и животной пищей (насекомые, их личинки, рыба, моллюски, раки). *N. procyonoides* также живет на влажных лугах с прилегающими заболоченными низинами, в поймах рек, заросших камышом и ивняком, приречных лесах с густым подлеском; основу ее рациона составляют насекомые, грызуны, а также растительные корма.

Уровни Hg у исследованных всеядных видов (*U. arctos*, *S. scrofa* и *N. procyonoides*) были сопоставимы с показателями для тех же видов из других регионов России и мира (Čelechovská et al., 2006; Florijancic et al., 2015; Kalisińska et al., 2009; Komov et al., 2016; Lazarus et al., 2014; Piskorová et al., 2003; Tomza-Marciniak et al., 2023). Концентрации Hg у *M. martes* были схожи с уровнями токсиканта, выявленными у животных из Вологодской области (Комов и др., 2012; Стёпина и др., 2013), но превышали таковые для куниц из Европы (Bilandžić et al., 2012; Kalisińska et al., 2009; Lodenius et al., 2014). В доступной литературе отсутствуют данные о содержании Hg у *S. betulina* и *A. amphibious*, но по сравнению с другими мелкими млекопитающими (Durkalec et al., 2019; Gerstenberger et al., 2006) исследованные нами животные имели более низкий уровень токсиканта в печени.

Группа растительноядных видов (наземные: *A. alces*, *C. elaphus*, *A. agrestis*; полуводные: *C. fiber*, *O. zibethicus*) в основном характеризовалась более низкими концентрациями Hg по сравнению с животными других трофических групп. Основу рациона *A. alces* и *C. elaphus* составляют травянистые растения, ветки кустарников и деревьев, *A. agrestis* – зеленые части растений, мхи и лишайники, кора и мелкие веточки кустарников и подроста деревьев. *O. zibethicus* питается прибрежными и водными растениями, тогда как *C. fiber* помимо этого – корой и тонкими ветками деревьев (осина, ива, береза). По сравнению с исследованиями из других стран, проведенными с использованием тех же или близкородственных видов (Bull et al., 1977; Cokoski et al., 2024; Dobrowolska and Melosik, 2002; Giżejewska et al., 2014), животные Карелии характеризовались сходными или более низкими уровнями Hg во внутренних органах.

⁶ WVDL, 2015. Normal range values for WVDL Toxicology. Интернет-ресурс. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/read/52919318/normal-range-values-for-wvdl-toxicology> (дата обращения: 18.12.2025).

Оценка риска ртутной интоксикации у млекопитающих Карелии

Показатели здоровья диких животных являются важными элементами комплексного подхода к оценке и мониторингу тенденций загрязнения окружающей среды Hg (Wolfe et al., 2007). Печально известны случаи массового хронического отравления людей и животных Hg в Японии (Minamata Disease: The History and Measures, 2002) и Ираке (Clarkson et al., 1981). В 1950-х гг. в японском заливе Минамата произошли драматические события, приведшие к многочисленным смертельным отравлениям Hg среди людей, кошек и диких птиц. У более 3000 пострадавших с повреждениями головного мозга была диагностирована так называемая болезнь Минамата, а ветеринарная медицина ввела термин «танцующие кошки» для описания неврологических симптомов, наблюдаемых у кошек. И болезнь Минамата, и «танцующие кошки» были результатом отравления ртутью, наряду с другими загрязнителями попавшей в залив с расположенного неподалеку химического завода. В отложениях залива бактерии превратили неорганическую Hg в MeHg, уровень которой постепенно увеличивался в организме животных на каждом последующем трофическом уровне. Большое количество MeHg в рыбе, ракообразных и мидиях поступало в организм людей и животных с пищей, что приводило к заболеваниям и смертельным отравлениям (Grandjean et al., 2010).

Трагедия в Ираке в конце 1971 г. также была вызвана массовым отравлением населения метилртутью (Clarkson et al., 1981). Источником токсиканта явилось импортированное из Мексики зерно, обработанное фунгицидами и предназначенное исключительно для посевных работ. Из-за задержки поставок и невозможности прочесть предупреждающие надписи на иностранном языке сельские жители использовали семена для приготовления пищи. Интоксикация сопровождалась симптомами, характерными для болезни Минамата (потеря зрения, нарушение координации, парестезия), и привела к гибели 650 человек. Несмотря на проводимые мероприятия по снижению ртутного загрязнения в мире, проблема рисков для благополучия экосистем и здоровья населения продолжает оставаться актуальной.

Как правило, свободноживущие наземные животные хронически подвергаются воздействию низких концентраций ртути, содержащейся в пище, воде и воздухе. В водной среде ртуть в гораздо большей степени интегрирована в пищевые цепи, поэтому пища водного происхождения может представлять значительную угрозу для здоровья человека и диких животных. Токсичность ртути изучалась на уровне молекул, клеток, тканей, организмов, видов и экосистем (Wolfe et al., 2007). Последствия хронического воздействия Hg на диких животных широко распространены и разнообразны: нейротоксические эффекты (например, нарушения зрения, атаксия), физиологические эффекты (гистопатология, задержка роста и др.), поведенческие эффекты (например, летаргия) и снижение репродуктивного успеха (Scheuhammer et al., 2015; Wolfe et al., 2007).

Диагностической лабораторией штата Висконсин (США)⁷ были определены референсные значения общей Hg во внутренних органах представителей семейств Cervidae, Mustelidae, Suidae, Canidae, Ursidae, Felidae. Концентрации токсиканта, выявленные в нашем исследовании у соответствующих видов этих таксонов, в целом не превышали установленные нормы и не являлись токсичными.

Связанные со смертностью концентрации Hg у млекопитающих были определены ранее только у плотоядных животных, представителей семейств Mustelidae (*Mustela vison*, *Lutra canadensis*, *L. lutra*) (Halbrook et al., 1994; Kim et al., 2023; O'Connor and Nielsen, 1981; Wobeser and Swift, 1976; Wren et al., 1987a, b) и Felidae (*Felis catus*, *F. concolor coryi*) (Albanus et al., 1972; Eaton et al., 1980; Roelke et al., 1993). На основании этих исследований можно утверждать, что среднегеометрическое значение летальной концентрации Hg составляет 42 мкг/г (диапазон 33–54) для печени, 37.5 мкг/г (диапазон 26–69) мкг/г для почек и 16 мкг/г (диапазон 11–21) для мозга (Shore et al., 2011). Вероятно, уровни Hg в печени и почках, превышающие примерно 25–30 мкг/г в обоих органах, могут быть связаны со смертельным исходом у плотоядных млекопитающих, а возможно, и у других групп млекопитающих (Shore et al., 2011).

Имеется малое число данных об уровне Hg в тканях, который может быть связан с нарушением репродуктивной функции у млекопитающих. У норок в этом случае содержание токсиканта в печени и почках составляло 30 и 36 мкг/г соответственно (Wren et al., 1987b), что находится в диапазоне летальных концентраций Hg. Также было отмечено, что накопление Hg у самок пантер (концентрация в крови > 0.5 мкг/г) приводило к снижению выживаемости их котят (Roelke et al., 1993).

⁷ WVDL, 2015. Normal range values for WVDL Toxicology. Интернет-ресурс. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/read/52919318/normal-range-values-for-wvdl-toxicology> (дата обращения: 18.12.2025).

В нашем исследовании медианные значения концентраций Hg у всех изученных видов млекопитающих были ниже летальных. Только у одной особи *N. vison* регистрировались концентрации ртути (22.75 и 16.35 мкг/г в печени и почке соответственно), которые, по всей видимости, можно охарактеризовать как сублетальные. Эта особь была умерщвлена собаками в окрестностях г. Петрозаводска в районе свалки, тогда как другие особи *N. vison* были добыты вдали от населенных пунктов.

Согласно Государственному докладу о состоянии окружающей среды РК⁸, за последние годы воздействия антропогенной ртути на природную среду Карелии не зафиксировано. При изучении накопления ртути в основных естественных природных и урбанизированных средах РК выявлено, что уровни этого металла в почве и растительности, воде и донных отложениях в исследованных районах не превышают принятых в России нормативов и близки к фоновым (Горбунов и др., 2019). Небольшая заселенность и малое число промышленных предприятий не повышают нагрузку на природу, но уникальный ландшафт и географическое положение делают регион уязвимым к техногенным катастрофам. Локальные воздействия, особенно в холодном климате, могут вызвать эрозии, заболачивание и проседание грунта. Основные угрозы загрязнения экосистем токсикантом исходят от крупных городов – Петрозаводска, Кондопоги и Костомукши, где работают металлургические, целлюлозно-бумажные и коммунальные предприятия. За пределами городов опасность представляют электростанции и перерабатывающие заводы.

Заключение

В ходе нашего исследования было подтверждено, что концентрация ртути в организме диких животных является результатом сочетания экологических процессов, влияющих на поступление Hg с пищей, и физиологических процессов, регулирующих усвоение, трансформацию и выведение этого металла.

Выявленные особенности уровня Hg у млекопитающих Карелии согласуются с известными закономерностями распределения токсиканта как между органами у отдельных видов, так и в пределах уровня консументов в пищевых цепях. Почти у всех исследованных видов содержание Hg было самым высоким в почке, реже в печени; исключением явилась *N. vison*, у которой концентрации металла были практически на одном уровне во всех исследованных тканях, а также *C. fiber* и *C. elaphus*, в организме которых ртуть преобладала в мышцах.

Исследование взаимосвязи между уровнями Hg в организме 18 видов млекопитающих и эколого-трофической специализацией животных выявило четкую закономерность: наиболее высокие концентрации металла характерны для плотоядных видов, за которыми следуют всеядные и растительноядные. Данная тенденция прослеживается как у наземных, так и у полуводных видов. Наземные всеядные животные характеризовались более высоким содержанием ртути по сравнению с околотовными всеядными и наземными растительноядными видами.

В нашем исследовании медианные значения концентраций Hg у всех изученных видов млекопитающих были ниже летальных, за исключением одной особи *N. vison*, у которой регистрировались сублетальные концентрации Hg. Уровни токсиканта, отмеченные у животных РК, в основном были сопоставимы с нормами для Cervidae, Mustelidae, Suidae, Canidae, Ursidae, Felidae и с концентрациями Hg у тех же или близкородственных видов животных из других регионов России и стран мира. Однако уникальный ландшафт и географическое положение РК делают экосистемы региона уязвимыми к токсическому действию Hg, в связи с чем необходимо продолжать мониторинговые исследования на этой территории.

Список литературы

- Безель, В.С., Большаков, В.Н., Воробейчик, Е.Л., 1994. Популяционная экотоксикология. Наука, Москва, Россия, 80 с.
- Горбунов, А.В., Ляпунов, С.М., Ермолаев, Б.В., 2019. Распределение ртути в природных и урбанизированных средах Карелии. *Экология человека* 4, 10–17.
- Иванова, Е.С., Румянцева, О.Ю., Удоденко, Ю.Г., Ельцова, Л.С., Комов, В.Т., 2023. Содержание ртути в органах мелких млекопитающих разных геоморфологических областей таежной зоны европейской части России. *Трансформация экосистем* 6 (5), 118–133. <https://doi.org/10.23859/estr-230717>

⁸ Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2024 г., 2025.

- Комов, В.Т., Степина, Е.С., Гремячих, В.А., Поддубная, Н.Я., Борисов, М.Я., 2012. Содержание ртути в органах млекопитающих семейства куньих (Mustelidae) Вологодской области. *Поволжский экологический журнал* 4, 385–393.
- Лисовский, А.А., Шефтель, Б.И., Савельев, А.П., Ермаков, О.А., Козлов, Ю.А. и др., 2019. Млекопитающие России: список видов и прикладные аспекты (Сборник трудов Зоологического музея МГУ. Т. 56). Товарищество научных изданий КМК, Москва, Россия, 191 с.
- Литвиненко, А.В., Богданова, М.С., Карпечко, В.А., Литвинова, И.А., Филатов, Н.Н., 2011. Водные ресурсы Карелии: основные проблемы рационального использования и охраны. *Труды Карельского научного центра Российской академии наук* 4, 12–20.
- Назаренко, И.И., Кислосева, И.В., Кашина, Л.И., 1986. Атомно-адсорбционное определение ртути в водах после сорбционного концентрирования на полимерном тиоэфире. *Журнал аналитической химии* 11 (8), 1385–1390.
- Полещук, А.Е., Целых, Е.Д., Ахтямов, М.Х., 2025. Мониторинговые показатели урбоэкосистемы г. Амурска вследствие ртутного загрязнения окружающей среды. *Экология урбанизированных территорий* 3, 32–44.
- Стёпина, Е.С., Поддубная, Н.Я., Комов, В.Т., 2013. Неинвазивное исследование участия куньих в транспорте ртути в наземной экосистеме на примере лесной куницы (*Martes martes*) в Вологодской области. *Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Череповецкие научные чтения-2012»*. Череповец, Россия, 253–256.
- Albanus, L., Frankenberg, L., Grant, C., Von Haartman, U., Jernelöv, A., Nordberg, G., Skerfving, S., 1972. Toxicity for cats of methylmercury in contaminated fish from Swedish lakes and of methylmercury hydroxide added to fish. *Environmental Research* 5 (4), 425–442. [https://doi.org/10.1016/0013-9351\(72\)90044-8](https://doi.org/10.1016/0013-9351(72)90044-8)
- Becker, D.J., Chumchal, M.M., Broders, H.G., Korstian, J.M., Clare, E.L. et al., 2018. Mercury bioaccumulation in bats reflects dietary connectivity to aquatic food webs. *Environmental Pollution* 233, 1076–1085. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.010>
- Bedouet, L., Ryser-Degiorgis, M.P., Borel, S., Amiot, C., Afonso, E., Coeurdassier, M., 2025. Evaluating trace elements as a conservation concern for Eurasian lynx (*Lynx lynx*) in Switzerland. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 298, 118300. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118300>
- Bilandžić, N., Deždek, D., Sedak, M., Đokić, M., Šimić, B., Rudan, N., Lisicin, T., 2012. Trace elements in tissues of wild carnivores and omnivores in Croatia. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 88 (1), 94–99. <https://doi.org/10.1007/s00128-011-0449-y>
- Bull, K.R., Roberts, R.D., Inskip, M.J., Goodman, G.T., 1977. Mercury concentrations in soil, grass, earthworms and small mammals near an industrial emission source. *Environmental Pollution* 12 (2), 135–140. [https://doi.org/10.1016/0013-9327\(77\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0013-9327(77)90016-7)
- Cabana, G., Rasmussen, J.B., 1994. Modelling food chain structure and contaminant bioaccumulation using stable nitrogen isotopes. *Nature* 372, 255–257.
- Čelechovská, O., Literák, I., Ondruš, S., Pospíšil, Z., 2006. Heavy metals in brown bears from the central European Carpathians. *Acta Veterinaria Brno* 75 (4), 501–506. <https://doi.org/10.2754/avb200675040501>
- Chételat, J., Ackerman, J.T., Eagles-Smith, C.A., Hebert, C.E., 2020. Methylmercury exposure in wildlife: A review of the ecological and physiological processes affecting contaminant concentrations and their interpretation. *Science of the Total Environment* 711, 135117. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135117>

- Clarkson, T.W., Magos, L., Cox, C., 1981. Tests of efficacy of antidotes for removal of methylmercury in human poisoning during the Iraq outbreak. *Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics* **218** (1), 74–83.
- Cokoski, K., Beuković, D., Horvatović, M.P., Maletić, V., Vukadinović, M., Stojković, E.D., Enimiteva, V., 2024. The levels of mercury (Hg) and arsenic (As) in wild boar's liver (*Sus scrofa*) in eleven hunting areas from the Republic of North Macedonia. *Šumarski list* **148**, 3–4.
- Cristol, D.A., Brasso, R.L., Condon, A.M., Fovargue, R.E., Friedman, S.L. et al., 2008. The movement of aquatic mercury through terrestrial food webs. *Science* **320**, 335. <https://doi.org/10.1126/science.1154082>
- Dahmardeh Behrooz, R., Poma, G., Barghi, M., 2022. Non-destructive mercury exposure assessment in the Brandt's hedgehog (*Paraechinus hypomelas*): spines as indicators of endogenous concentrations. *Environmental Science and Pollution Research* **29**, 56502–56510. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19926-0>
- de Lima Lemes, M.J., 2010. A new analytical method for methylmercury speciation and its application for the study of methylmercury-thiol complexes. *PhD thesis*. University of Manitoba, Winnipeg, Canada, 138 p.
- Dibbern, M., Elmeros, M., Dietz, R., Søndergaard, J., Michelsen, A., Sonne, C., 2021. Mercury exposure and risk assessment for Eurasian otters (*Lutra lutra*) in Denmark. *Chemosphere* **272**, 129608. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129608>
- Ding, C., Chen, J., Zhu, F., Chai, L., Lin, Z., Zhang, K., Shi, Y., 2022. Biological toxicity of heavy metal (loid)s in natural environments: From microbes to humans. *Frontiers in Environmental Science* **10**, 920957. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.920957>
- Dobrowolska, A., Melosik, M., 2002. Mercury contents in liver and kidneys of wild boar (*Sus scrofa*) and red deer (*Cervus elaphus*). *Zeitschrift für Jagdwissenschaft* **48** (Suppl. 1), 156–160. <https://doi.org/10.1007/BF02192403>
- Durkalec, M., Nawrocka, A., Żmudzki, J., Filipek, A., Niemcewicz, M., Posyniak, A., 2019. Concentration of mercury in the livers of small terrestrial rodents from rural areas in Poland. *Molecules* **24** (22), 4108. <https://doi.org/10.3390/molecules24224108>
- Eagles-Smith, C.A., Ackerman, J.T., 2009. Rapid changes in small fish mercury concentrations in estuarine wetlands: Implications for wildlife risk and monitoring programs. *Environmental Science and Technology* **43**, 8658–8664.
- Eaton, R.D.P., Secord, D.C., Hewitt, P., 1980. An experimental assessment of the toxic potential of mercury in ringed seal liver for adult laboratory cats. *Toxicology and Applied Pharmacology* **55** (3), 514–521. [https://doi.org/10.1016/0041-008X\(80\)90053-8](https://doi.org/10.1016/0041-008X(80)90053-8)
- Evans, R.D., Grochowina, N.M., Basu, N., O'Connor, E.M., Hickie, B.E. et al., 2016. Uptake of selenium and mercury by captive mink: Results of a controlled feeding experiment. *Chemosphere* **144**, 1582–1588. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.09.096>
- Florijancic, T., Ozimec, S., Jelkic, D., Vuksic, N., Bilandzic, N., Gross Boskovic, A., Boskovic, I., 2015. Assessment of heavy metal content in wild boar (*Sus scrofa*) hunted in eastern Croatia. *Journal of Environmental Protection and Ecology* **16** (2), 630–636.
- Gamberg, M., Braune, B.M., 1999. Contaminant residue levels in Arctic wolves (*Canis lupus*) from the Yukon Territory, Canada. *Science of the Total Environment* **243–244**, 329–338. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00408-8](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00408-8)

- Gerstenberger, S.L., Cross, C.L., Divine, D.D., Gulmatico, M.L., Rothweiler, A.M., 2006. Assessment of mercury concentrations in small mammals collected near Las Vegas, Nevada, USA. *Environmental Toxicology* **21** (6), 583–589.
- Giebichenstein, J., Andersen, T., Varpe, Ø., Gabrielsen, G.W., Borgå, K., 2025. Little seasonal variation of mercury concentrations and biomagnification in an Arctic pelagic food web. *Progress in Oceanography* **231**, 103381. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2024.103381>
- Giżewska, A., Spodniewska, A., Barski, D., 2014. Concentration of lead, cadmium, and mercury in tissues of European beaver (*Castor fiber*) from the north-eastern Poland. *Journal of Veterinary Research* **58** (1), 77–80. <https://doi.org/10.2478/bvip-2014-0012>
- Gover, R.A., 1991. Toxic effects of metals. In: Amdur, M.O. et al. (eds.), *Casarett and Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons. 4th edition*. Pergamon Press, New York, USA, 623–680.
- Grandjean, P., Satoh, H., Murata, K., Eto, K., 2010. Adverse effects of methylmercury: environmental health research implications. *Environmental Health Perspectives* **118** (8), 1137–1145. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901757>
- Gworek, B., Dmuchowski, W., Baczewska-Dąbrowska, A.H., 2020. Mercury in the terrestrial environment: A review. *Environmental Sciences Europe* **32** (1), 1–19. <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00401-x>
- Halbrook, R.S., Jenkins, J.H., Bush, P.B., Seabolt, N.D., 1994. Sublethal concentrations of mercury in river otters: monitoring environmental contamination. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* **27** (3), 306–310. <https://doi.org/10.1007/BF00213164>
- Isaksson, C., 2010. Pollution and its impact on wild animals: a meta-analysis on oxidative stress. *EcoHealth* **7** (3), 342–350. <https://doi.org/10.1007/s10393-010-0345-7>
- Kalisińska, E. (ed.), 2019. Mammals and birds as bioindicators of trace element contaminations in terrestrial environments: an ecotoxicological assessment of the Northern Hemisphere. Springer, Cham, Germany, 708 p.
- Kalisińska, E., Lisowski, P., Salicki, W., Kucharska, T., Kavetska, K., 2009. Mercury in wild terrestrial carnivorous mammals from north-western Poland and unusual fish diet of red fox. *Acta Theriologica* **54** (4), 345–356. <https://doi.org/10.4098/j.at.0001-7051.032.2008>
- Kim, G., Ahn, S., Lee, S.J., Choi, S.Y., Cho, H.S., Oh, Y., 2023. Mercury poisoning in Eurasian river otter (*Lutra lutra*). *Journal of Ecology and Environment* **47**, 1. <https://doi.org/10.5141/jee.23.025>
- Komov, V.T., Ivanova, E.S., Gremyachikh, V.A., Poddubnaya, N.Y., 2016. Mercury content in organs and tissues of indigenous (*Vulpes vulpes* L.) and invasive (*Nyctereutes procyonoides* Gray) species of canids from areas near Cherepovets (North-Western Industrial Region, Russia). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **97** (4), 480–485. <https://doi.org/10.1007/s00128-016-1891-7>
- Lake, J.L., Ryba, S.A., Serbst, J., Brown IV, C.F., Gibson, L., 2007. Mercury and stable isotopes of carbon and nitrogen in mink. *Environmental Toxicology and Chemistry* **26** (12), 2611–2619.
- Lavoie, R.A., Jardine, T.D., Chumchal, M.M., Kidd, K.A., Campbell, L.M., 2013. Biomagnification of mercury in aquatic food webs: a worldwide meta-analysis. *Environmental Science and Technology* **47** (23), 13385–13394. <https://doi.org/10.1021/es403103t>
- Lazarus, M., Sekovanić, A., Reljić, S., Kusak, J., Kovačić, J. et al., 2014. Selenium in brown bears (*Ursus arctos*) from Croatia: Relation to cadmium and mercury. *Journal of Environmental Science and Health. Part A* **49** (12), 1392–1401. <https://doi.org/10.1080/10934529.2014.928497>

- Lodenius, M., Skarén, U., Hellstedt, P., Tulisalo, E., 2014. Mercury in various tissues of three mustelid species and other trace metals in liver of European otter from Eastern Finland. *Environmental Monitoring and Assessment* **186** (1), 325–333. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3376-z>
- McGrew, A.K., Ballweber, L.R., Moses, S.K., Stricker, C.A., Beckmen, K.B., Salman, M.D., O'Hara, T.M., 2014. Mercury in gray wolves (*Canis lupus*) in Alaska: Increased exposure through consumption of marine prey. *Science of the Total Environment* **468**, 609–613. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.045>
- Minamata Disease: The History and Measures, 2002. Environmental Health Department, Ministry of the Environment, Tokyo, Japan. <https://www.env.go.jp/en/chemi/hs/minamata2002/index.html> (дата обращения: 03.03.2026).
- Noël, M., Spence, J., Harris, K.A., Robbins, C.T., Fortin, J.K., Ross, P.S., Christensen, J.R., 2014. Grizzly bear hair reveals toxic exposure to mercury through salmon consumption. *Environmental Science and Technology* **48**, 7560–7567. <https://doi.org/10.1021/es500631g>
- O'Connor, D.J., Nielsen, S.W., 1981. Environmental survey of methylmercury levels in wild mink (*Mustela vison*) and otter (*Lutra canadensis*) from the northeastern United States and experimental pathology of methylmercurialism in the otter. *Worldwide Furbearer Conference proceedings*, 3–11.08.1980. Frostburg, MD, USA, 1728–1745.
- Ottemo, V.G., 2009. Sporelementer i gaupe i Norge. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim, Norway, 125 p. (In Norwegian).
- Pankakoski, E., Hyvärinen, H., Jalkanen, M., Koivisto, I., 1993. Accumulation of heavy metals in the mole in Finland. *Environmental Pollution* **80** (1), 9–16. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(93\)90003-7](https://doi.org/10.1016/0269-7491(93)90003-7)
- Piskorová, L., Vasilková, Z., Krupicer, I., 2003. Heavy metal residues in tissues of wild boar (*Sus scrofa*) and red fox (*Vulpes vulpes*) in the Central Zemplín region of the Slovak Republic. *Czech Journal of Animal Science* **48** (3), 134–138.
- Roelke, M.E., Martenson, J.S., O'Brien, S.J., 1993. The consequences of demographic reduction and genetic depletion in the endangered Florida panther. *Current Biology* **3** (6), 340–350.
- Samburova, M., Safonov, V., Bratashova, T., Salimzade, E., 2021. Elemental status of european mole (*T. europaea*) in the conditions of the plast region of the Chelyabinsk Oblast in Russian. *Proceedings of Asia Conference on Environment and Sustainable Development 2021*. Springer Singapore, Singapore, 367–374
- Scheuhammer, A.M., Sandheinrich, M.B., 2008. Recent advances in the toxicology of methylmercury in wildlife. *Ecotoxicology* **17**, 67–68. <https://doi.org/10.1007/s10646-007-0186-5>
- Scheuhammer, A.M., Braune, B., Chan, H.M., Frouin, H., Krey, A. et al., 2015. Recent progress on our understanding of the biological effects of mercury in fish and wildlife in the Canadian Arctic. *Science of the Total Environment* **509–510**, 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.142>
- Shore, R.F., Pereira, M.G., Walker, L.A., Thompson, D.R., 2011. Mercury in nonmarine birds and mammals. In: Beyer, W.N., Meador, J.P. (eds.), *Environmental contaminants in biota*. CRC Press, Boca Raton, USA, 609–642.
- Squadrone, S., Chiaravalle, E., Gavinelli, S., Monaco, G., Rizzi, M., Abete, M.C., 2015. Analysis of mercury and methylmercury concentrations, and selenium: Mercury molar ratios for a toxicological assessment of sperm whales (*Physeter macrocephalus*) in the most recent stranding event along the Adriatic coast (Southern Italy, Mediterranean Sea). *Chemosphere* **138**, 633–641. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.07.047>

- Subotić, S., Višnjić-Jeftić, Ž., Penezić, A., Ćirović, D., 2017. Concentrations of selected elements in liver tissue of grey wolves (*Canis lupus*) from Serbia. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **99** (6), 701–705. <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2209-0>
- Talmage, S.S., Walton, B.T., 1993. Food chain transfer and potential renal toxicity of mercury to small mammals at a contaminated terrestrial field site. *Ecotoxicology* **2**, 243–256. <https://doi.org/10.1007/BF00368533>
- Tomza-Marciniak, A., Pilarczyk, B., Drozd, R., Pilarczyk, R., Juszczak-Czasnojc, M., Havryliak, V., Udała, J., 2023. Selenium and mercury concentrations, Se:Hg molar ratios and their effect on the antioxidant system in wild mammals. *Environmental Pollution* **322**, 121234. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121234>
- Vass, G., Könyves, L., Berlinger, B., Bende, A., 2025. Examination of heavy metal toxicity in weasels (*Mustela nivalis*) based on samples from Austria. *Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції «Концептуальні шляхи розвитку науки та освіти»*. Львів, Україна, 12–16.
- Vo, A.T.E., Bank, M.S., Shine, J.P., Edwards, S.V., 2011. Temporal increase in organic mercury in an endangered pelagic seabird assessed by century-old museum specimens. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **108**, 7466–7471.
- Wobeser, G., Swift, M., 1976. Mercury poisoning in a wild mink. *Journal of Wildlife Diseases* **12**, 335–340.
- Wolfe, M., Atkeson, T., Bowerman, W., Burger, J., Evers, D.C., Murray, M.W., Zillioux, E. (eds.), 2007. Wildlife indicators. In: Harris, R., et al. (eds.), *Ecosystem responses to mercury contamination: indicators of change*. CRC Press, Boca Raton, USA, 281–304.
- Wren, C.D., Stokes, P.M., Fischer, K.L., 1986. Mercury levels in Ontario mink and otter relative to food levels and environmental acidification. *Canadian Journal of Zoology* **64**, 2854–2859.
- Wren, C.D., Hunter, D.B., Leatherland, J.E., Stokes, P.M., 1987a. The effects of polychlorinated biphenyls and methylmercury, singly and in combination, on mink. I. Uptake and toxic responses. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* **16**, 441–447.
- Wren, C.D., Hunter, D.B., Leatherland, J.F., Stokes, P.M., 1987b. The effects of polychlorinated biphenyls and methylmercury, singly and in combination on mink: II. Reproduction and kit development. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* **16**, 449–454.
- Zillioux, E.J., Porcella, D.B., Benoit, J.M., 1993. Mercury cycling and effects in freshwater wetland ecosystems. *Environmental Toxicology and Chemistry* **12** (12), 2245–2264. <https://doi.org/10.1002/etc.5620121208>

References

- Albanus, L., Frankenberg, L., Grant, C., Von Haartman, U., Jernelöv, A., Nordberg, G., Skerfving, S., 1972. Toxicity for cats of methylmercury in contaminated fish from Swedish lakes and of methylmercury hydroxide added to fish. *Environmental Research* **5** (4), 425–442. [https://doi.org/10.1016/0013-9351\(72\)90044-8](https://doi.org/10.1016/0013-9351(72)90044-8)
- Becker, D.J., Chumchal, M.M., Broders, H.G., Korstian, J.M., Clare, E.L. et al., 2018. Mercury bioaccumulation in bats reflects dietary connectivity to aquatic food webs. *Environmental Pollution* **233**, 1076–1085. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.010>
- Bedouet, L., Ryser-Degiorgis, M.P., Borel, S., Amiot, C., Afonso, E., Coeurdassier, M., 2025. Evaluating trace elements as a conservation concern for Eurasian lynx (*Lynx lynx*) in Switzerland. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **298**, 118300. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118300>

- Bezel', V.S., Bol'shakov, V.N., Vorobeychik, E.L., 1994. Populyatsionnaya ekotoksikologiya [Population ecotoxicology]. Nauka, Moscow, Russia, 80 p. (In Russian).
- Bilandžić, N., Deždek, D., Sedak, M., Đokić, M., Šimić, B., Rudan, N., Lisicin, T., 2012. Trace elements in tissues of wild carnivores and omnivores in Croatia. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **88** (1), 94–99. <https://doi.org/10.1007/s00128-011-0449-y>
- Bull, K.R., Roberts, R.D., Inskip, M.J., Goodman, G.T., 1977. Mercury concentrations in soil, grass, earthworms and small mammals near an industrial emission source. *Environmental Pollution* **12** (2), 135–140. [https://doi.org/10.1016/0013-9327\(77\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0013-9327(77)90016-7)
- Cabana, G., Rasmussen, J.B., 1994. Modelling food chain structure and contaminant bioaccumulation using stable nitrogen isotopes. *Nature* **372**, 255–257.
- Čelechovská, O., Literák, I., Ondruš, S., Pospíšil, Z., 2006. Heavy metals in brown bears from the central European Carpathians. *Acta Veterinaria Brno* **75** (4), 501–506. <https://doi.org/10.2754/avb200675040501>
- Chételat, J., Ackerman, J.T., Eagles-Smith, C.A., Hebert, C.E., 2020. Methylmercury exposure in wildlife: A review of the ecological and physiological processes affecting contaminant concentrations and their interpretation. *Science of the Total Environment* **711**, 135117. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135117>
- Clarkson, T.W., Magos, L., Cox, C., 1981. Tests of efficacy of antidotes for removal of methylmercury in human poisoning during the Iraq outbreak. *Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics* **218** (1), 74–83.
- Cokoski, K., Beuković, D., Horvatović, M.P., Maletić, V., Vukadinović, M., Stojković, E.D., Enimiteva, V., 2024. The levels of mercury (Hg) and arsenic (As) in wild boar's liver (*Sus scrofa*) in eleven hunting areas from the Republic of North Macedonia. *Šumarski list* **148**, 3–4.
- Cristol, D.A., Brasso, R.L., Condon, A.M., Fovargue, R.E., Friedman, S.L. et al., 2008. The movement of aquatic mercury through terrestrial food webs. *Science* **320**, 335. <https://doi.org/10.1126/science.1154082>
- Dahmardeh Behrooz, R., Poma, G., Barghi, M., 2022. Non-destructive mercury exposure assessment in the Brandt's hedgehog (*Paraechinus hypomelas*): spines as indicators of endogenous concentrations. *Environmental Science and Pollution Research* **29**, 56502–56510. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19926-0>
- de Lima Lemes, M.J., 2010. A new analytical method for methylmercury speciation and its application for the study of methylmercury-thiol complexes. *PhD thesis*. University of Manitoba, Winnipeg, Canada, 138 p.
- Dibbern, M., Elmeros, M., Dietz, R., Søndergaard, J., Michelsen, A., Sonne, C., 2021. Mercury exposure and risk assessment for Eurasian otters (*Lutra lutra*) in Denmark. *Chemosphere* **272**, 129608. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129608>
- Ding, C., Chen, J., Zhu, F., Chai, L., Lin, Z., Zhang, K., Shi, Y., 2022. Biological toxicity of heavy metal (loid)s in natural environments: From microbes to humans. *Frontiers in Environmental Science* **10**, 920957. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.920957>
- Dobrowolska, A., Melosik, M., 2002. Mercury contents in liver and kidneys of wild boar (*Sus scrofa*) and red deer (*Cervus elaphus*). *Zeitschrift für Jagdwissenschaft* **48** (Suppl. 1), 156–160. <https://doi.org/10.1007/BF02192403>

- Durkalec, M., Nawrocka, A., Żmudzki, J., Filipek, A., Niemcewicz, M., Posyniak, A., 2019. Concentration of mercury in the livers of small terrestrial rodents from rural areas in Poland. *Molecules* **24** (22), 4108. <https://doi.org/10.3390/molecules24224108>
- Eagles-Smith, C.A., Ackerman, J.T., 2009. Rapid changes in small fish mercury concentrations in estuarine wetlands: Implications for wildlife risk and monitoring programs. *Environmental Science and Technology* **43**, 8658–8664.
- Eaton, R.D.P., Secord, D.C., Hewitt, P., 1980. An experimental assessment of the toxic potential of mercury in ringed seal liver for adult laboratory cats. *Toxicology and Applied Pharmacology* **55** (3), 514–521. [https://doi.org/10.1016/0041-008X\(80\)90053-8](https://doi.org/10.1016/0041-008X(80)90053-8)
- Evans, R.D., Grochowina, N.M., Basu, N., O'Connor, E.M., Hickie, B.E. et al., 2016. Uptake of selenium and mercury by captive mink: Results of a controlled feeding experiment. *Chemosphere* **144**, 1582–1588. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.09.096>
- Florijancic, T., Ozimec, S., Jelkic, D., Vuksic, N., Bilandzic, N., Gross Boskovic, A., Boskovic, I., 2015. Assessment of heavy metal content in wild boar (*Sus scrofa*) hunted in eastern Croatia. *Journal of Environmental Protection and Ecology* **16** (2), 630–636.
- Gamberg, M., Braune, B.M., 1999. Contaminant residue levels in Arctic wolves (*Canis lupus*) from the Yukon Territory, Canada. *Science of the Total Environment* **243–244**, 329–338. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00408-8](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00408-8)
- Gerstenberger, S.L., Cross, C.L., Divine, D.D., Gulmatico, M.L., Rothweiler, A.M., 2006. Assessment of mercury concentrations in small mammals collected near Las Vegas, Nevada, USA. *Environmental Toxicology* **21** (6), 583–589.
- Giebichenstein, J., Andersen, T., Varpe, Ø., Gabrielsen, G.W., Borgå, K., 2025. Little seasonal variation of mercury concentrations and biomagnification in an Arctic pelagic food web. *Progress in Oceanography* **231**, 103381. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2024.103381>
- Giżejewska, A., Spodniewska, A., Barski, D., 2014. Concentration of lead, cadmium, and mercury in tissues of European beaver (*Castor fiber*) from the north-eastern Poland. *Journal of Veterinary Research* **58** (1), 77–80. <https://doi.org/10.2478/bvip-2014-0012>
- Gorbunov, A.V., Lyapunov, S.M., Ermolaev, B.V., 2019. Raspredelenie rtuti v prirodnykh i urbanizirovannykh sredakh Karelii [Mercury distribution in natural and urbanized environments of Karelia]. *Ekologiya cheloveka [Human Ecology]* **4**, 10–17. (In Russian).
- Gover, R.A., 1991. Toxic effects of metals. In: Amdur, M.O. et al. (eds.), *Casarett and Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons. 4th edition*. Pergamon Press, New York, USA, 623–680.
- Grandjean, P., Satoh, H., Murata, K., Eto, K., 2010. Adverse effects of methylmercury: environmental health research implications. *Environmental Health Perspectives* **118** (8), 1137–1145. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901757>
- Gworek, B., Dmuchowski, W., Baczewska-Dąbrowska, A.H., 2020. Mercury in the terrestrial environment: A review. *Environmental Sciences Europe* **32** (1), 1–19. <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00401-x>
- Halbrook, R.S., Jenkins, J.H., Bush, P.B., Seabolt, N.D., 1994. Sublethal concentrations of mercury in river otters: monitoring environmental contamination. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* **27** (3), 306–310. <https://doi.org/10.1007/BF00213164>
- Isaksson, C., 2010. Pollution and its impact on wild animals: a meta-analysis on oxidative stress. *EcoHealth* **7** (3), 342–350. <https://doi.org/10.1007/s10393-010-0345-7>

- Ivanova, E.S., Rumiantseva, O.Y., Udodenko, Y.G., Eltsova, L.S., Komov, V.T., 2023. Mercury content in the organs of small mammals in different geomorphological regions of the taiga zone of the European part of Russia. *Ecosystem Transformation* **6** (5), 118–133. <https://doi.org/10.23859/estr-230717>
- Kalisińska, E. (ed.), 2019. Mammals and birds as bioindicators of trace element contaminations in terrestrial environments: an ecotoxicological assessment of the Northern Hemisphere. Springer, Cham, Germany, 708 p.
- Kalisińska, E., Lisowski, P., Salicki, W., Kucharska, T., Kavetska, K., 2009. Mercury in wild terrestrial carnivorous mammals from north-western Poland and unusual fish diet of red fox. *Acta Theriologica* **54** (4), 345–356. <https://doi.org/10.4098/j.at.0001-7051.032.2008>
- Kim, G., Ahn, S., Lee, S.J., Choi, S.Y., Cho, H.S., Oh, Y., 2023. Mercury poisoning in Eurasian river otter (*Lutra lutra*). *Journal of Ecology and Environment* **47**, 1. <https://doi.org/10.5141/jee.23.025>
- Komov, V.T., Stepina, E.S., Gremyachikh, V.A., Poddubnaya, N.Ya., Borisov, M.Ya., 2012. Soderzhanie rtuti v organakh mlekopitayushchikh semeystva kun'ikh (Mustelidae) Vologodskoy oblasti [Mercury content in the organs of mammals of the mustelid family (Mustelidae) of the Vologda region]. *Povolzhskiy ehkologicheskiy zhurnal [Volga Region Journal of Ecology]* **4**, 385–393. (In Russian).
- Komov, V.T., Ivanova, E.S., Gremyachikh, V.A., Poddubnaya, N.Y., 2016. Mercury content in organs and tissues of indigenous (*Vulpes vulpes* L.) and invasive (*Nyctereutes procyonoides* Gray) species of canids from areas near Cherepovets (North-Western Industrial Region, Russia). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **97** (4), 480–485. <https://doi.org/10.1007/s00128-016-1891-7>
- Lake, J.L., Ryba, S.A., Serbst, J., Brown IV, C.F., Gibson, L., 2007. Mercury and stable isotopes of carbon and nitrogen in mink. *Environmental Toxicology and Chemistry* **26** (12), 2611–2619.
- Lavoie, R.A., Jardine, T.D., Chumchal, M.M., Kidd, K.A., Campbell, L.M., 2013. Biomagnification of mercury in aquatic food webs: a worldwide meta-analysis. *Environmental Science and Technology* **47** (23), 13385–13394. <https://doi.org/10.1021/es403103t>
- Lazarus, M., Sekovanić, A., Reljić, S., Kusak, J., Kovačić, J. et al., 2014. Selenium in brown bears (*Ursus arctos*) from Croatia: Relation to cadmium and mercury. *Journal of Environmental Science and Health. Part A* **49** (12), 1392–1401. <https://doi.org/10.1080/10934529.2014.928497>
- Lisovskiy, A.A., Sheftel', B.I., Savel'ev, A.P., Ermakov, O.A., Kozlov, Yu.A. et al., 2019. Mlekopitayushchie Rossii: spisok vidov i prikladnye aspekty (Sbornik trudov Zoologicheskogo muzeya MGU. T. 56) [Mammals of Russia: list of species and applied aspects (Collection of works of the Zoological Museum of Moscow State University. Vol. 56)]. KMK Scientific Press Ltd, Moscow, Russia, 191 p. (In Russian).
- Litvinenko, A.V., Bogdanova, M.S., Karpechko, V.A., Litvinova, I.A., Filatov, N.N., 2011. Vodnye resursy Karelii: osnovnye problemy ratsional'nogo ispol'zovaniya i okhrany [Water resources of Karelia: main problems of rational use and protection]. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk [Transactions of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]* **4**, 12–20. (In Russian).
- Lodenius, M., Skarén, U., Hellstedt, P., Tulisalo, E., 2014. Mercury in various tissues of three mustelid species and other trace metals in liver of European otter from Eastern Finland. *Environmental Monitoring and Assessment* **186** (1), 325–333. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3376-z>
- McGrew, A.K., Ballweber, L.R., Moses, S.K., Stricker, C.A., Beckmen, K.B., Salman, M.D., O'Hara, T.M., 2014. Mercury in gray wolves (*Canis lupus*) in Alaska: Increased exposure through consumption of marine prey. *Science of the Total Environment* **468**, 609–613. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.045>

- Minamata Disease: The History and Measures, 2002. Environmental Health Department, Ministry of the Environment, Tokyo, Japan. <https://www.env.go.jp/en/chemi/hs/minamata2002/index.html> (accessed: 03.03.2026).
- Nazarenko, I.I., Kisloeva, I.V., Kashina, L.I., 1986. Atomno-adsorbtsionnoe opredelenie rtuti v vodakh posle sorbtsionnogo kontsentrirvaniya na polimernom tioehfire [Atomic adsorption determination of mercury in waters after sorption preconcentration on a polymeric thioether]. *Zhurnal analiticheskoy khimii [Journal of Analytical Chemistry]* **11** (8), 1385–1390. (In Russian).
- Noël, M., Spence, J., Harris, K.A., Robbins, C.T., Fortin, J.K., Ross, P.S., Christensen, J.R., 2014. Grizzly bear hair reveals toxic exposure to mercury through salmon consumption. *Environmental Science and Technology* **48**, 7560–7567. <https://doi.org/10.1021/es500631g>
- O'Connor, D.J., Nielsen, S.W., 1981. Environmental survey of methylmercury levels in wild mink (*Mustela vison*) and otter (*Lutra canadensis*) from the northeastern United States and experimental pathology of methylmercurialism in the otter. *Worldwide Furbearer Conference proceedings*, 3–11.08.1980. Frostburg, MD, USA, 1728–1745.
- Ottemo, V.G., 2009. Sporelementer i gaupe i Norge. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim, Norway, 125 p. (In Norwegian).
- Pankakoski, E., Hyvärinen, H., Jalkanen, M., Koivisto, I., 1993. Accumulation of heavy metals in the mole in Finland. *Environmental Pollution* **80** (1), 9–16. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(93\)90003-7](https://doi.org/10.1016/0269-7491(93)90003-7)
- Piskorová, L., Vasilková, Z., Krupicer, I., 2003. Heavy metal residues in tissues of wild boar (*Sus scrofa*) and red fox (*Vulpes vulpes*) in the Central Zemplín region of the Slovak Republic. *Czech Journal of Animal Science* **48** (3), 134–138.
- Poleshchuk, A.E., Tselykh, E.D., Akhtyamov, M.H., 2025. Monitoringovyie pokazateli urboekosistemy g. Amurska vsledstvie rtutnogo zagryazneniya okruzhayushchey sredy [Monitoring indicators of the urban ecosystem of Amursk due to mercury pollution of the environment]. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy [Ecology of Urbanized Areas]* **3**, 32–44. (In Russian).
- Roelke, M.E., Martenson, J.S., O'Brien, S.J., 1993. The consequences of demographic reduction and genetic depletion in the endangered Florida panther. *Current Biology* **3** (6), 340–350.
- Samburova, M., Safonov, V., Bratashova, T., Salimzade, E., 2021. Elemental status of european mole (*T. europaea*) in the conditions of the plast region of the Chelyabinsk Oblast in Russian. *Proceedings of Asia Conference on Environment and Sustainable Development 2021*. Springer Singapore, Singapore, 367–374
- Scheuhammer, A.M., Sandheinrich, M.B., 2008. Recent advances in the toxicology of methylmercury in wildlife. *Ecotoxicology* **17**, 67–68. <https://doi.org/10.1007/s10646-007-0186-5>
- Scheuhammer, A.M., Braune, B., Chan, H.M., Frouin, H., Krey, A. et al., 2015. Recent progress on our understanding of the biological effects of mercury in fish and wildlife in the Canadian Arctic. *Science of the Total Environment* **509–510**, 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.142>
- Shore, R.F., Pereira, M.G., Walker, L.A., Thompson, D.R., 2011. Mercury in nonmarine birds and mammals. In: Beyer, W.N., Meador, J.P. (eds.), *Environmental contaminants in biota*. CRC Press, Boca Raton, USA, 609–642.
- Squadrone, S., Chiaravalle, E., Gavinelli, S., Monaco, G., Rizzi, M., Abete, M.C., 2015. Analysis of mercury and methylmercury concentrations, and selenium: Mercury molar ratios for a toxicological assessment of sperm whales (*Physeter macrocephalus*) in the most recent stranding event along

- the Adriatic coast (Southern Italy, Mediterranean Sea). *Chemosphere* **138**, 633–641. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.07.047>
- Stepina, E.S., Poddubnaya, N.Ya., Komov, V.T., 2013. Neinvazivnoe issledovanie uchastiya kun'ikh v transporte tutiv nazemnoy ekosisteme na primere lesnoy kunitsey (*Martes martes*) v Vologodskoy oblasti [Non-invasive study of the participation of mustelids in mercury transport in a terrestrial ecosystem using the pine marten (*Martes martes*) in the Vologda region as an example]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Cherepovetskie nauchnye chteniya-2012"* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Cherepovets Scientific Readings-2012"], 253–256. (In Russian).
- Subotić, S., Višnjić-Jeftić, Ž., Penezić, A., Ćirović, D., 2017. Concentrations of selected elements in liver tissue of grey wolves (*Canis lupus*) from Serbia. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **99** (6), 701–705. <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2209-0>
- Talmage, S.S., Walton, B.T., 1993. Food chain transfer and potential renal toxicity of mercury to small mammals at a contaminated terrestrial field site. *Ecotoxicology* **2**, 243–256. <https://doi.org/10.1007/BF00368533>
- Tomza-Marciniak, A., Pilarczyk, B., Drozd, R., Pilarczyk, R., Juszczak-Czasnojc, M., Havryliak, V., Udała, J., 2023. Selenium and mercury concentrations, Se:Hg molar ratios and their effect on the antioxidant system in wild mammals. *Environmental Pollution* **322**, 121234. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121234>
- Vass, G., Könyves, L., Berlinger, B., Bende, A., 2025. Examination of heavy metal toxicity in weasels (*Mustela nivalis*) based on samples from Austria. *Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції «Концептуальні шляхи розвитку науки та освіти»*. Львів, Україна, 12–16.
- Vo, A.T.E., Bank, M.S., Shine, J.P., Edwards, S.V., 2011. Temporal increase in organic mercury in an endangered pelagic seabird assessed by century-old museum specimens. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **108**, 7466–7471.
- Wobeser, G., Swift, M., 1976. Mercury poisoning in a wild mink. *Journal of Wildlife Diseases* **12**, 335–340.
- Wolfe, M., Atkeson, T., Bowerman, W., Burger, J., Evers, D.C., Murray, M.W., Zillioux, E. (eds.), 2007. Wildlife indicators. In: Harris, R., et al. (eds.), *Ecosystem responses to mercury contamination: indicators of change*. CRC Press, Boca Raton, USA, 281–304.
- Wren, C.D., Stokes, P.M., Fischer, K.L., 1986. Mercury levels in Ontario mink and otter relative to food levels and environmental acidification. *Canadian Journal of Zoology* **64**, 2854–2859.
- Wren, C.D., Hunter, D.B., Leatherland, J.E., Stokes, P.M., 1987a. The effects of polychlorinated biphenyls and methylmercury, singly and in combination, on mink. I. Uptake and toxic responses. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* **16**, 441–447.
- Wren, C.D., Hunter, D.B., Leatherland, J.F., Stokes, P.M., 1987b. The effects of polychlorinated biphenyls and methylmercury, singly and in combination on mink: II. Reproduction and kit development. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* **16**, 449–454.
- Zillioux, E.J., Porcella, D.B., Benoit, J.M., 1993. Mercury cycling and effects in freshwater wetland ecosystems. *Environmental Toxicology and Chemistry* **12** (12), 2245–2264. <https://doi.org/10.1002/etc.5620121208>