

Оригинальная статья

УДК 573.6(063)+504:59(063)

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-3-257-267>

СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОБЩЕЙ РТУТИ У МЕЛКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ВБЛИЗИ г. ЧЕРЕПОВЦА ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ

Е. А. Агеева^{1, 2✉}, Н. Я. Поддубная¹, М. О. Щукина^{1, 2}

¹ Череповецкий государственный университет

Россия, 162600, г. Череповец, просп. Луначарского, д. 5

² Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН

Россия, 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок

Поступила в редакцию 22.08.2023 г., после доработки 27.12.2023 г., принята 29.12.2023 г., опубликована 30.09.2024 г.

Аннотация. Ртуть является одним из наиболее опасных загрязнителей окружающей среды вследствие ее высокой токсичности для животных и человека. Целью исследования является определение наличия или отсутствия сезонных изменений содержания ртути у мелких млекопитающих в лесных экосистемах вблизи г. Череповца. Изучали шерсть, органы и ткани обыкновенной бурозубки (*Sorex araneus* Linnaeus, 1758) и лесной мыши (*Apodemus urallensis* Pallas, 1811) в течение сентября 2020 – августа 2021 гг. Содержание общей ртути (ОНг) в высушенных образцах ($n = 319$) определяли на ртутном анализаторе РА-915+ с приставкой ПИРО атомно-абсорбционным методом холодного пара. Индивидуальные содержания ОНг у лесной мыши варьируют от < 0.001 (предела чувствительности прибора) в почках, селезенке, мозге, мышцах, печени до 0.560 мг/кг сухой массы в селезенке, среднее максимальное значение ОНг было в селезенке (0.179 ± 0.072 мг/кг) и минимальное в мышцах (0.023 ± 0.011 мг/кг). Индивидуальные содержания ОНг у обыкновенной бурозубки варьируют от < 0.001 (предела чувствительности прибора) в мозге до 4.570 мг/кг сухой массы в шерсти, среднее максимальное значение ОНг было в шерсти (0.754 ± 0.152 мг/кг), а среднее минимальное – в печени (0.112 ± 0.013 мг/кг). Было установлено, что уровень концентраций ОНг у обыкновенных бурозубок выше зимой, чем летом, статистически значимые различия установлены для шерсти, мышц и печени ($H = 9.427$, $p = 0.008$; $H = 13.828$, $p = 0.001$; $H = 6.864$, $p = 0.033$ соответственно). Межвидовое сравнение показало различия в сезонных изменениях содержания ОНг: осенью оно было выше у обыкновенной бурозубки, чем у лесной мыши, статистически значимые различия установлены для шерсти, почек и мышц ($H = 23.143$, $p = 0.005$; $H = 19.905$, $p = 0.046$; $H = 33.418$, $p = 0.001$ соответственно).

Ключевые слова: экологическая токсикология, землеройки, мышевидные грызуны, сезонные изменения показателей

Соблюдение этических норм. Протоколы с использованием животных были одобрены Комиссией по биоэтике ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет» (протокол № 1-2023 от 25.12.2023 г.).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

✉ Для корреспонденции. Лаборатория экологической паразитологии Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН.

ORCID и e-mail адреса: Агеева Елена Александровна: <https://orcid.org/0009-0006-0151-2632>, elena.ageeva.2019@mail.ru; Поддубная Надежда Яковлевна: <https://orcid.org/0000-0001-9109-1363>, poddoubnaia@mail.ru; Щукина Мария Олеговна: <https://orcid.org/0009-0008-2711-6050>, a89217334226@yandex.ru.

Для цитирования. Агеева Е. А., Поддубная Н. Я., Щукина М. О. Сезонные изменения содержания общей ртути у мелких млекопитающих в лесных экосистемах вблизи г. Череповца Вологодской области // Поволжский экологический журнал. 2024. № 3. С. 257 – 267. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-3-257-267>

ВВЕДЕНИЕ

Ртуть (Hg) и ее соединения относятся к числу наиболее опасных загрязнителей окружающей среды, обладающих высоким кумулятивным потенциалом и способных оказывать токсическое воздействие на здоровье человека и животных даже в низких концентрациях. Она обладает уникальными физическими и химическими свойствами, которые лежат в основе ее повсеместного присутствия в окружающей среде и ее высокой степени биоусиления (Eagles-Smith et al., 2016; Gremyachikh et al., 2019).

Наземные мелкие млекопитающие (такие как землеройки, полевки, мыши) успешно используются в биомониторинге и экотоксикологических исследованиях (Petkovšek, 2014). Они в большей степени подвержены воздействию загрязнителей из-за небольшого размера тела и высокой скорости метаболизма (Levengood, Heske, 2008). Поступление соединений тяжелых металлов в организм мелких млекопитающих в первую очередь связано с типом питания вида, пищевыми привычками и образом жизни (Martinková, 2019). Отмечаются самые высокие уровни биоаккумуляции соединений тяжелых металлов сорикоморфами, поскольку рацион питания многих из них в основном состоит из дождевых червей, которые, как известно, сильно накапливают соединения тяжелых металлов (Roodbergen et al., 2008). Они могут быть полезными биомониторами загрязнения ртутью в наземных экосистемах, поскольку населяют ограниченные территории, имеют последовательные привычки питания, относительно легко добываются, живут короткой жизнью и быстро размножаются (Petkovšek et al., 2014).

В настоящее время большинство исследований посвящено накоплению ртути в водной среде, в то время как исследованиям биоаккумуляции ртути в наземных экосистемах уделяется меньше внимания (Komov et al., 2017; Jedruch et al., 2021). Большой массив данных получен для различных водных объектов, в том числе по сезонным колебаниям ртути. Объектами таких исследований являлись различные морские и промысловые рыбы (Keva et al., 2017; Kelly et al., 2018), ракообразные (de Almeida Rodrigues et al., 2020). Имеется несколько работ по сезонным изменениям содержания общей ртути у околотовных птиц и птиц атлантического побережья (Overjordet et al., 2015; Lane et al., 2020).

В наземных экосистемах изучение ртути выполнялось в основном в связи с водоемами (Rutkowska et al., 2019 и др.). Не так много исследований, затрагивающих изучение систем, не связанных с водными объектами (Bull et al., 1977). Еще меньше исследований по распределению ртути в течение нескольких сезонов. Сезонная динамика – это реалистичная характеристика протекания естественных процессов в экосистеме. Среди млекопитающих сезонные колебания содержания ртути изучались у европейской косули (Pokorný et al., 2002) и татранской серны (Ballová et al., 2021).

Цель исследования – определение наличия или отсутствия сезонных изменений содержания ртути у мелких млекопитающих в лесных экосистемах вблизи г. Череповца Вологодской области.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом для работы послужили мелкие млекопитающие: 45 особей обыкновенной бурозубки (*Sorex araneus* Linnaeus, 1758) и 20 особей лесной мыши (*Apodemus uralensis* Pallas, 1811). Отловы по стандартной методике (Sheftel, 2018) производились в лесных экосистемах, расположенных на южной границе г. Череповца (в 3 – 8 км от промышленной зоны металлургического завода ПАО «Северсталь») в сентябре 2020 – августе 2021 гг. (рис. 1). Период проведения исследования совпал с годом низкой численности грызунов вследствие высокого уровня осадков в сезон размножения мелких млекопитающих и низкого уровня снежного покрова зимой и весной. В работе было принято деление на региональные погодно-климатические сезоны: осенний (сентябрь, октябрь), зимний (ноябрь – февраль), весенний (март – май) и летний (июнь – август).

У мелких млекопитающих брали образцы шерсти, тканей и органов (мозг, печень, почки, селезенка, химус, мышцы) примерно по 0.5 мм³ и помещали в пробирки Эппендорфа, замораживали и хранили при температуре около -16°C. Всего было собрано 269 образцов органов и 50 образцов шерсти. Перед анализом на содержание ртути пробы шерсти и органов высушивались в открытых пробирках при температуре 37°C в течение 48 часов в сушильном шкафу (SNOL 20/300) (AB UMEGA-GROUP, Литва).

Содержание общей ртути (ОНг – суммарный показатель ртути, включающий все формы ртути, которые были в пробе) в высушенных образцах определяли ртутным анализатором РА-915+ с приставкой ПИРО атомно-абсорбционным методом холодного пара (Ivanova et al., 2014). Точность аналитических методов измерения контролировали с использованием сертифицированного биологического материала DORM-2 и DOLN-2 (Институт химии окружающей среды, Оттава, Канада).

Полученные данные обрабатывали общепринятыми методами статистики, вычисляли максимальное и минимальное значение, медиану, среднее значение и ошибку средней и стандартное отклонение. Распределение исходных данных отличалось от нормального,

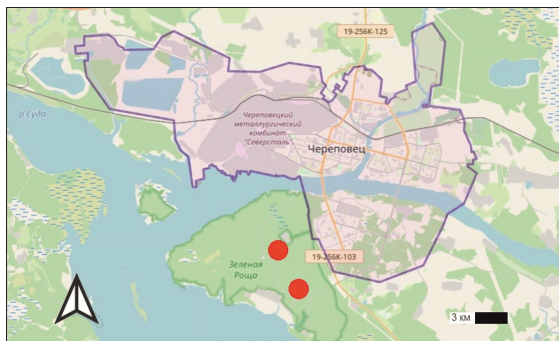


Рис. 1. Карта-схема района исследований: — границы г. Череповца, ● – места отлова мелких млекопитающих (<https://www.openstreetmap.org/#map=2/69.6/-74.9>)

Fig. 1. A schematic map of the study area: — marks the borders of the Cherepovets town, ● are the capture places of small mammals (<https://www.openstreetmap.org/#map=2/69.6/-74.9>)

поэтому использовали ранговый критерий Краскела – Уоллиса. Различия признавали значимыми при $p < 0.05$.

Статистический анализ данных проводился с помощью пакета программ STATISTICA Release 7 Microsoft Excel 2016 (Microsoft Corp.).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Индивидуальные содержания ОНг в шерсти и органах лесной мыши варьируют от < 0.001 (предела чувствительности прибора) в почках, селезенке, мозге, мышцах, печени до 0.560 мг/кг сухой массы в селезенке. В шерсти и органах лесной мыши среднее значение было максимальным в селезенке (0.179 ± 0.07 мг/кг сухой массы) и минимальным в мышцах (0.023 ± 0.011 мг/кг сухой массы), и в целом для этого вида характерно накопление ртути в ряду: мышцы (0.023 мг/кг) $<$ почки (0.057 мг/кг) $<$ шерсть (0.067 мг/кг) $<$ печень (0.068 мг/кг) $<$ химус (0.074 мг/кг) $<$ мозг (0.085 мг/кг) $<$ селезенка (0.179 мг/кг).

Индивидуальные содержания ОНг в шерсти и органах обыкновенной бурозубки варьирует от < 0.001 (предела чувствительности прибора) в мозге до 4.570 мг/кг сухой массы в шерсти. В шерсти, органах и тканях этой бурозубки среднее значение было максимальным в шерсти (0.754 ± 0.152 мг/кг сухой массы) и минимальным в печени (0.112 ± 0.013 мг/кг сухой массы). Для этого фоновового вида района исследований характерно накопление ртути в ряду: печень (0.112) $<$ мозг (0.126) $<$ селезенка (0.133) $<$ химус (0.146) $<$ мышцы (0.157) $<$ почки (0.208) $<$ шерсть (0.754 мг/кг сухой массы).

Отмечены межвидовые различия в уровне накопления ртути исследуемых мелких млекопитающих (рис. 2). Среднее содержание общей ртути почти во всех органах, кроме селезенки, выше в исследуемых органах обыкновенной бурозубки. Статистически значимые различия отмечены в шерсти, почках и мышцах ($H = 20.945$, $p = 0.0004$; $H = 22.211$, $p = 0.0004$; $H = 30.091$, $p = 0.00002$ соответственно).

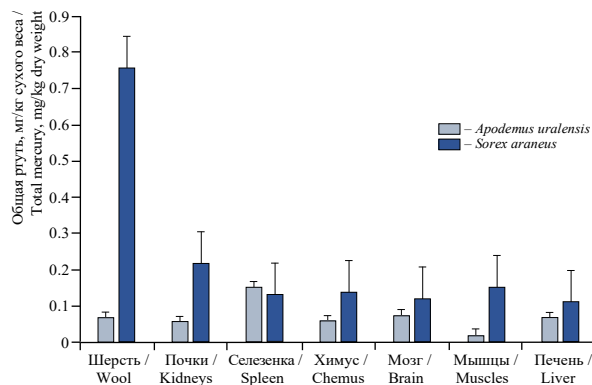


Рис. 2. Среднее содержание общей ртути в органах и тканях лесной мыши ($n = 20$) и обыкновенной бурозубки ($n = 45$)

Fig. 2. Average content of total mercury in the organs and tissues of *Apodemus uralensis* ($n = 20$) and *Sorex araneus* ($n = 45$)

Было установлено, что уровень концентраций ОНг у обыкновенных бурозубок выше зимой, чем летом, статистически значимые различия установлены для шерсти, мышц и печени ($H = 9.427$, $p = 0.008$; $H = 13.828$, $p = 0.001$; $H = 6.864$, $p = 0.033$ соответственно) (рис. 3). Для других сезонов статистически значимых различий не выявлено.

Межвидовое сравнение показало различия в сезонных изменениях содержания

СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОБЩЕЙ РТУТИ

ОНг: осенью оно было выше у обыкновенной бурозубки, чем у лесной мыши, статистически значимые различия установлены для шерсти, почек и мышц ($H = 23.143, p = 0.005$; $H = 19.905, p = 0.046$; $H = 33.418, p = 0.001$ соответственно).

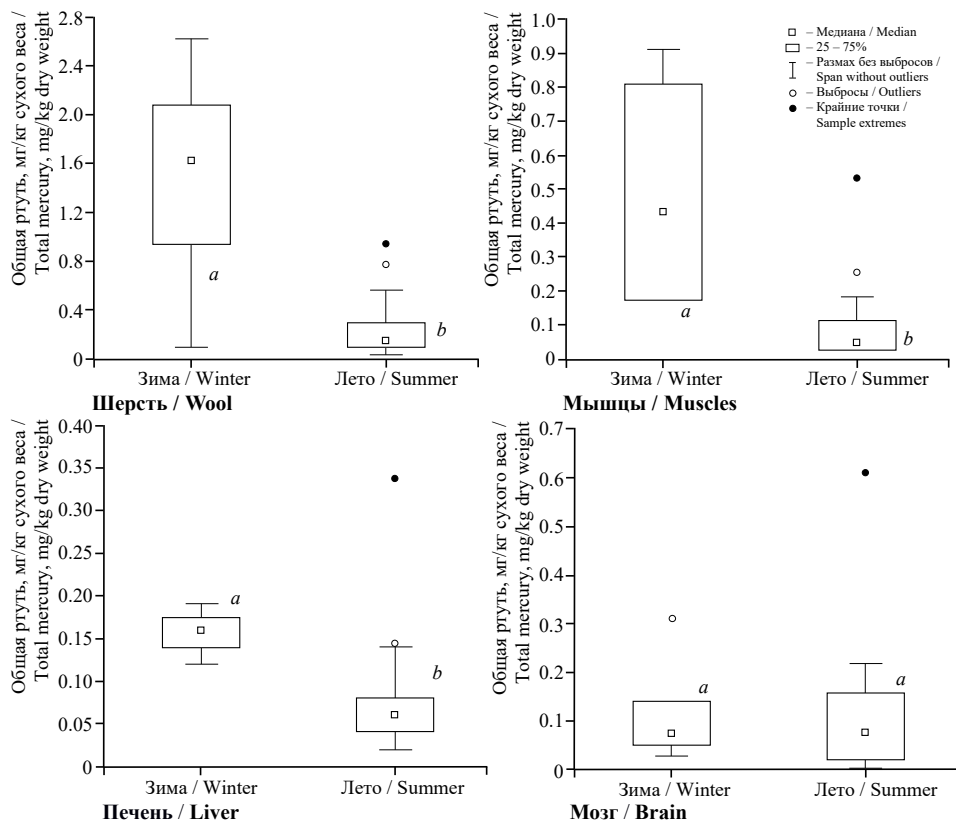


Рис. 3. Содержание ОНг у обыкновенной бурозубки; обозначения *a* и *b* характерны для статистически значимых различий; *a* и *a* – различия статистически незначимы

Fig. 3. THg content in *Sorex araneus*. The designations *a* and *b* are typical for statistically significant differences while *a* and *a* mean that the differences are not statistically significant

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Чаще всего изучается содержание ртути в головном мозге, мышцах, печени и почках, причем самые высокие концентрации ртути обнаруживают в двух последних органах (Ershova, Zaitsev, 2016; Komov et al., 2017). В настоящем исследовании максимальные значения установлены в шерсти и селезенке. Как показали Т. С. Ершова и В. Ф. Зайцев (Ershova, Zaitsev, 2016), значительные концентрации общей ртути отмечены в органах, для которых характерно активное протекание

процессов метаболизма и активное участие в процессах, направленных на поддержание гомеостаза, таких как селезенка (Ershova, Zaitsev, 2016).

В нашем исследовании самые высокие уровни ОНг в селезенке отмечены у лесной мыши, а максимальные значения ОНг в шерстном покрове – у обыкновенной бурозубки. По-видимому, такие различия связаны с эколого-физиологической спецификой грызунов и насекомыхоядных. Если во внутренних органах ртуть накапливается и выводится, то в шерсти – накапливается во время ростовой фазы (Paskukhov et al., 2011).

В зоне металлургического завода в г. Череповце средний уровень ОНг в печени лесной мыши (0.068 мг/кг сухой массы), в печени *Ap. flavicollis* из Словении (0.06 – 0.33 мг/кг) (Расуна, 2006), *Ap. sylvaticus* из северной Испании (0.018 мг/кг) (Fernández, 2012) и Великобритании (0.001 и 0.076 мг/кг) (Bull et al., 1977) позволяет предположить, что найденный нами уровень примерно соответствует антропогенным экосистемам вблизи электростанций (Расуна, 2006) и из различных загрязненных и незагрязненных районов Галиции на севере Испании (Fernández, 2012) и составляет одну пятую от уровня ртути вблизи свинцового плавильного завода в Словении (Расуна, 2006).

Средний годовой уровень ОНг в печени лесной мыши (0.068 мг/кг сухой массы) в два раза выше, чем в печени рыжей полевки (*Myodes glareolus*) в вегетационный период из того же района в 2009 – 2010 гг. (Komov et al., 2017). При этом летом содержание ртути в печени и других органах лесной мыши сопоставимо с уровнем ртути у рыжей полевки в этот же период: ОНг у рыжей полевки было в почках 0.021, печени 0.014, мышцах 0.014, мозге 0.008 мг/кг (Komov et al., 2017), у лесной мыши – в почках 0.017, печени 0.010, мышцах <0.0010, мозге 0.007 мг/кг сухой массы. Ртуть поступает в организм мелких млекопитающих преимущественно с животной пищей (Ivanter, 2008; Komov et al., 2017) и лишайниками (St. Pierre et al., 2015; Weiss-Penzias et al., 2019) и в меньшей степени – с растительной пищей (Ivanter, 2008; Komov et al., 2017). Мыши относительно часто поедают различных беспозвоночных животных и реже – позвоночных во все сезоны (Ivanter, 2008; Ivanova et al., 2014), лесные полевки также нередко поедают насекомых в летний период (Ivanter, 2008; Ivanova et al., 2014) и лишайники в разные сезоны года (Aristov et al., 1981; Ivanter, 2008). Относительное сходство в питании лесных полевок и лесной мыши сопровождается сходным уровнем концентрации общей ртути в их тканях и органах.

По данным Komov et al. (2017), в районе г. Череповца максимальные значения у рыжей полевки и обыкновенной бурозубки определены в почках и печени. В нашем случае у обыкновенной бурозубки содержание ОНг в печени занимает промежуточные значения. Известно, содержание ртути в печени накапливается с возрастом (Keva et al., 2017), в нашей выборке, собранной не только летом, но осенью и зимой, преобладают молодые еще не размножающиеся особи.

Среднегодовая концентрация ОНг в печени обыкновенной бурозубки (0.112 мг/кг сухой массы) вдвое выше, чем у лесной мыши (0.067 мг/кг сухой массы), и это очевидно связано с поеданием бурозубками только беспозвоночных животных, в то время как для мышей насекомые являются дополнительным кормом.

Среднелетняя концентрация ОНг в печени обыкновенной бурозубки (0.087 мг/кг) меньше в три раза, чем, по данным Komov et al. (2017), среднелетняя 0.2 и 0.18 мг/кг в 2009 и 2010 гг. Это также в пять раз меньше, чем у близких по питанию трех видов *Sorex* в Сихотэ-Алине (0.56 мг/кг сухого веса) (Poddubnaya et al., 2020). Сихотэ-Алинь расположен очень близко к Тихому океану, поэтому морские туманы могут влиять на повышение концентрации ртути в наземной биоте (Weiss-Penzias, 2019; Poddubnaya et al., 2021). Найденный нами уровень ртути в печени обыкновенной бурозубки в 3 – 10 раз меньше, чем в печени землероек в промышленных районах Европы и Северной Америки (Bull et al., 1977; Komov et al., 2017). Выявленный нами низкий уровень содержания ртути у обыкновенных бурозубок может свидетельствовать о том, что они обитают на относительно мало загрязненных территориях. Например, *Crocidura russula*, обитающая в околородных и влажных местах и питающаяся полуводными животными, содержала 0.83 и 0.38 мг/кг в контроле и 1.49 и 1.11 мг/кг на загрязненной территории вблизи колчеданного рудника в Испании (Baeyens et al., 1996).

В сезоны с разной влажностью животные накапливают разное количество ртути, а именно во влажные сезоны ртути накапливается больше. Например, общие концентрации ртути в рыбе в сезон дождей примерно в 15 раз выше, чем в сухой сезон (Kelly et al., 2018), аналогична ситуация с крабами-плавунцами (de Almeida Rodrigues et al., 2020). Однако, в нашем исследовании средний уровень ОНг у обыкновенной бурозубки в многоводные 2021 – 2022 гг. ниже, чем в засушливые 2009 и 2010 гг. (Komov et al., 2017). Причина этого пока не ясна.

Одними из причин наличия сезонных изменений считаются различия в доступности источников пищи, смены питания и физиологические процессы. Так, в исследовании татранской серны (*Rupicapra rupicapra tatrica*) (Ballová et al., 2021) концентрации ОНг в сердце, мышцах и шерсти были выше летом по сравнению с зимой; у обыкновенного сига (*Coregonus lavaretus* (L.)) (Keva et al., 2017) в печени и мышцах самыми высокими значения были зимой и самыми низкими летом; у косуль (*Capreolus capreolus*) (Pokorný, 2002) концентрация ОНг в почках была значительно выше в конце лета и ранней осенью. В нашем исследовании значения концентраций общей ртути у бурозубок обыкновенных выше зимой, чем летом, статистически значимые различия установлены в шерсти, мышцах и печени. Возможно, существует взаимосвязь между содержанием ОНг и круговоротом воды. Более высокая доступность ртути характерна в сезоны с большим количеством осадков (Ma et al., 2015; Martinková, 2019). Снег, как концентрированная форма осадков, может давать повышенное содержание ртути (Martinková, 2019).

Сезон отбора проб следует учитывать всякий раз, когда используются объекты живой природы в качестве накопительного биоиндикатора загрязнения окружающей среды (Pokorný, 2002). Волосной покров морских и наземных млекопитающих играет значительную роль в накоплении и последующем ежегодном удалении ртути вместе со старым волосом во время процесса линьки (Pastukhov et al., 2011). Положительная значимая корреляция концентрации ртути в парах тканей, включая шерсть, позволяет поддержать предложение Poddubnaya с соавторами (2020) использовать только шерсть как неинвазивный метод для общей оценки уровня ртутных соединений у диких животных охраняемых территорий.

Таким образом, полученные результаты указывают на необходимость дальнейшего исследования сезонных изменений содержания общей ртути в наземной экосистеме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования установлены уровни концентраций ОНг у обыкновенных бурозубок более высокие зимой по сравнению с летом, статистически значимые различия получены для шерсти, мышц и печени ($H = 9.427$, $p = 0.008$; $H = 13.828$, $p = 0.001$; $H = 6.864$, $p = 0.033$ соответственно). Установлены межвидовые сезонные различия содержания ОНг: осенью они были выше у обыкновенной бурозубки, чем у лесной мыши, статистически значимые различия получены для шерсти, почек и мышц ($H = 23.143$, $p = 0.005$; $H = 19.905$, $p = 0.046$; $H = 33.418$, $p = 0.001$ соответственно).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Aristov A. A., Bashenina N. V., Bernstein A. D., Bolshakov V. N., Voronov G. A., Demidov V. V., Gambaryan P. P., Gaiduk V. E., Gebchinsky M., Golisheva V., Grabe B., Eremina I. V., Zablotskaya L. V., Zeida Y., Ivanter E. V., Kalyakin V. N., Kratochvil J., Kryzhanovskaya V. V., Kudryashova L. M., Likyavichene N. M., Maldzhunaite S. A., Miholap O. N., Moskvitina N. S., Myasnikov Yu. A., Obrtel R., Okulova N. M., Povalishina T. P., Prusaite Ya. A., Ryltseva E. V., Samarsky S. L., Skurat L. N., Sokolov V. E., Sokolov G. A., Suchkova N. G., Terekhov V. F., Turyeva V. V., Ushakov V. P., Khokhlova I. G., Shaldybin L. S., Shubin N. G. *Bank Vole*. Moscow, Nauka, 1981. 268 p. (in Russian).

Baeyens W., Ebinghaus R., Vasiliev O., eds. *Global and Regional Mercury Cycles: Sources, Fluxes and Mass Balances*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1996. 563 p.

Ballová Z. K., Janiga M., Holub M., Chovancová G. Temporal and seasonal changes in mercury accumulation in Tatra chamois from West Carpathians. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, iss. 37, pp. 52133–52146. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14380-w>

Bull K. R., Roberts R. D., Inskip M. J., Goodman G. T. Mercury concentrations in soil, grass, earthworms, and small mammals near an industrial emission source. *Environmental Pollution*, 1977, vol. 12, iss. 2, pp. 135–140. [https://doi.org/10.1016/0013-9327\(77\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0013-9327(77)90016-7)

de Almeida Rodrigues P., Ferrari R. G., Hauser-Davis R. A., Dos Santos L. N., Conte-Junior C. A. Seasonal influences on swimming crab mercury levels in an eutrophic estuary located in southeastern Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, iss. 3, pp. 3473–3482. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07052-3>

Eagles-Smith C. A., Wiener J. G., Eckley C. S., Willacker J. J., Evers D. C., Marvin-DiPasquale M., Obrist D., Fleck J. A., Aiken G. R., Lepak J. M., Jackson A. K., Webster J. P., Stewart A. R., Davis J. A., Alpers C. N., Ackerman J. T. Mercury in western North America: A synthesis of environmental contamination, fluxes, bioaccumulation, and risk to fish and wildlife. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 568, pp. 1213–1226. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.094>

Ershova T. S., Zaitsev V. F. Content of mercury in organs and tissues of Caspian seal (*Phoca caspica* Gmelin, 1788). *South of Russia: Ecology, Development*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 69–78 (in Russian). <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2016-1-69-78>

Fernández Á. J., Aboal J. R., Gonzalez X. I., Carballeira A. Transfer and bioaccumulation variability of Cd, Co, Cr, Hg, Ni and Pb in trophic compartments of terrestrial ecosystems in northern Spain. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2012, vol. 21, iss. 11, pp. 3527–3532.

Gremyachikh V., Kvasov D., Ivanova E. Patterns of mercury accumulation in the organs of bank vole *Myodes glareolus* (Rodentia, Cricetidae). *Biosystems Diversity*, 2019, vol. 27, no. 4, pp. 329–333. <https://doi.org/10.15421/011943>

Ivanova E. S., Komov V. T., Poddubnaya N. Ya., Gremyachikh V. A. *Insectivores, Rodents, Mustelids and Canines of Near-water Territories and Their Participation in Mercury Transport in the Ecosystems of the Vologda Oblast*. Cherepovets, Cherepovets State University Publ., 2014. 184 p. (in Russian).

Ivanter E. V. *Mammals of Karelia*. Petrozavodsk, Petrozavodsk State University Press, 2008. 296 p. (in Russian).

Jedruch A., Falkowska L., Saniewska D., Durkalec M., Nawrocka A., Kalisińska E., Pacyna J. M. Status and trends of mercury pollution of the atmosphere and terrestrial ecosystems in Poland. *Ambio*, 2021, vol. 50, iss. 9, pp. 1698–1717. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01505-1>

Kelly B. C., Myo A. N., Pi N., Bayen S., Leakhena P. C., Chou M., Tan B. H. Human exposure to trace elements in central Cambodia: Influence of seasonal hydrology and food-chain bioaccumulation behaviour. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, vol. 162, pp. 112–120. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.06.071>

Keva O., Hayden B., Harrod C., Kahilainen K. K. Total mercury concentrations in liver and muscle of European whitefish (*Coregonus lavaretus* (L.)) in a subarctic lake – Assessing the factors driving year-round variation. *Environmental Pollution*, 2017, vol. 231, pp. 1518–1528. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.09.012>

Komov V. T., Ivanova E. S., Poddubnaya N. Y., Gremyachikh V. A. Mercury in soil, earthworms and organs of voles *Myodes glareolus* and shrew *Sorex araneus* in the vicinity of an industrial complex in Northwest Russia (Cherepovets). *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, vol. 189, iss. 3, article no. 104. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5799-4>

Lane O., Adams E. M., Pau N., O'Brien K. M., Regan K., Farina M., Schneider-Moran T., Zarudsky J. Long-term monitoring of mercury in adult saltmarsh sparrows breeding in Maine, Massachusetts and New York, USA 2000–2017. *Ecotoxicology*, 2020, vol. 29, iss. 8, pp. 1148–1160. <https://doi.org/10.1007/s10646-020-02180-w>

Levengood J. M., Heske E. J. Heavy metal exposure, reproductive activity, and demographic patterns in white-footed mice (*Peromyscus leucopus*) inhabiting a contaminated floodplain wetland. *Science of the Total Environment*, 2008, vol. 389, iss. 2-3, pp. 320–328. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.08.050>

Ma M., Wang D., Sun T., Zhao Z., Du H. Forest runoff increase mercury output from subtropical forest catchments: an example from an alpine reservoir in a national nature reserve (southwestern China). *Environmental Science and Policy*, 2015, vol. 22, iss. 4, pp. 2745–2756. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3549-5>

Martinková B., Janiga M., Pogányová A. Mercury contamination of the snow voles (*Chionomys nivalis*) in the West Carpathians. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26, iss. 35, pp. 35988–35995. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06714-6>

Overjordet I. B., Kongsrud M. B., Gabrielsen G. W., Berg T., Ruus A., Evenset A., Borgå K., Christensen G., Jenssen B. M. Toxic and essential elements changed in black-legged kittiwakes (*Rissa tridactyla*) during their stay in an Arctic breeding area. *Science of the Total Environment*, 2015, vol. 502, pp. 548–556. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.058>

Pacyna E. G., Pacyna J. M., Steenhuisen F., Wilson S. Global anthropogenic mercury emission inventory for 2000. *Atmospheric Environment*, 2006, vol. 40, iss. 22, pp. 4048–4063. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.03.041>

Pastukhov M. V., Epov V. N., Ciesielski T., Alieva V. I., Grebenshchikova V. I. Distribution and bioaccumulation of mercury in Baikal seal. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Biology. Ecology*, 2011, vol. 4, no. 1, pp. 56–66 (in Russian).

Petkovšek S., Kopušar N., Kryštufek B. Small mammals as biomonitors of metal pollution: A case study in Slovenia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, vol. 186, pp. 4261–4274. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3696-7>

Poddubnaya N. Ya., Eltsova L. S., Fishchenko N. M., Salkina G. P., Voloshina I. V., Ivanova Ye. S. Mercury concentration in the tissues of the three abundant shrew species (*Sorex araneus*, *S. caecutiens*, and *S. isodon*) inhabiting the Sikhote-Alin mountain system. *Journal of Critical Reviews*, 2020, vol. 7, iss. 13, pp. 2850–2861. <https://doi.org/10.31838/jcr.07.13.436>

Poddubnaya N. Y., Salkina G. P., Eltsova L. S., Ivanova E. S., Oleynikov A. Yu., Pavlov D. D., Kryukov V. Kh., Rumyantseva O. Yu. Mercury content in the Siberian tiger (*Panthera tigris altaica* Temminck, 1844) from the coastal and inland areas of the Russia. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, article no. 6923. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86411-y>

Pokorny B., Ribaric-Lasnik C. Seasonal variability of mercury and heavy metals in roe deer (*Capreolus capreolus*) kidney. *Environmental Pollution*, 2002, vol. 117, iss. 1, pp. 35–46. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00161-0](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00161-0)

Roodbergen M., Klok C., VanDerHout A. Transfer of heavy metals in food chain earthworm Black-tailed godwit (*Limosa limosa*): Comparison of polluted and reference site in the Netherlands. *Science of the Total Environment*, 2008, vol. 406, iss. 3, pp. 407–412. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.051>

Rutkowska M., Bajger-Nowak G., Kowalewska D., Bzoma S., Kalisińska E., Namieśnik J., Konieczka P. Methylmercury and total mercury content in soft tissues of two birdspecies wintering in the Baltic Sea near Gdansk, Poland. *Chemosphere*, 2019, vol. 219, pp. 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.162>

Sheftel B. I. Methods for estimating the abundance of small mammals. *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 2018, vol. 3, no. 3, pp. 1–21 (in Russian). <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2018-3-4>

St. Pierre K. A., St. Louis V. L., Kirk Lehnher I., Wang S., La Farge C. Importance of open marine waters to the enrichment of total mercury and monomethylmercury in lichens in the Canadian high arctic. *Environmental Science & Technology*, 2015, vol. 49, iss. 10, pp. 5930–5938. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00347>

Weiss-Penzias P. S., Bank M. S., Clifford D. L., Torregrosa A., Zheng B., Lin W., Wilmers C. C. Marine fog inputs appear to increase methylmercury bioaccumulation in a coastal terrestrial food web. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, article no. 17611. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54056-7>

Seasonal changes in the total mercury in small mammals in forest ecosystems near Cherepovets town, Vologda region

E. A. Ageeva ^{1,2✉}, N. Ya. Poddubnaya ¹, M. O. Schukina ^{1,2}

¹ Cherepovets State University

5 Lunacharskogo Ave., Cherepovets 162600, Russia

² Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences
Borok village, Nekouzsky district, Yaroslavl region 152742, Russia

Received: August 22, 2023 / revised: December 27, 2023 / accepted: December 29, 2023 / published: September 30, 2024

Abstract. Mercury is one of the most dangerous environmental pollutants due to its high toxicity to animals and humans. The aim of the study was to determine the presence or absence of seasonal changes in the mercury level in small mammals in forest ecosystems near the Cherepovets town. The fur, organs and tissues of the common shrew (*Sorex araneus* Linnaeus, 1758) and Ural field mouse (*Apodemus uralensis* Pallas, 1811) were examined during September 2020–August 2021. The content of total mercury (THg) in dried samples ($n = 319$) was determined on a PA-915+ mercury analyzer with a PYRO console by cold vapor atomic absorption. The content of THg in the Ural field mouse varies from <0.001 (sensitivity limit of the device) in the kidneys, spleen, brain, muscles, and liver up to 0.560 mg/kg dry weight in the spleen; the average maximum THg value was found in the spleen (0.179 ± 0.072 mg/kg) and the minimum was in the muscles (0.023 ± 0.011 mg/kg). The content of THg in the common shrew varies from <0.001 (sensitivity limit of the device) in the brain up to 4.570 mg/kg dry weight in the fur, the average maximum THg value was found in the fur (0.754 ± 0.152 mg/kg), and the average minimum was in the liver (0.112 ± 0.013 mg/kg). It was established that the level of THg in common shrews was higher in winter than in summer, statistically significant differences were found for the fur, muscles, and liver ($p = 0.008, 0.001, 0.033$, respectively, at $p < 0.05$). An interspecies comparison showed differences in seasonal changes in the THg content, namely: in autumn it was higher in the common shrew than in the Ural field mouse; statistically significant differences were found for the fur, kidneys, and muscles ($p = 0.005, 0.046, 0.001$, respectively, at $p < 0.05$).

Keywords: environmental toxicology, shrews, mouse-like rodents, seasonal indicator changes

Ethics approval and consent to participate. Animal protocols were approved by the Bioethics Commission of Cherepovets State University (protocol No. 1-2023 dated December 25, 2023).

Competing interests: The authors have declared that no competing interests exist.

For citation: Ageeva E. A., Poddubnaya N. Ya., Schukina M. O. Seasonal changes in the total mercury in small mammals in forest ecosystems near Cherepovets town, Vologda region. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2024, no. 3, pp. 257–267 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-3-257-267>

✉ *Corresponding author.* Laboratory of Ecological Parasitology, Papanin Institute for Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Elena A. Ageeva: <https://orcid.org/0009-0006-0151-2632>, elena.ageeva.2019@mail.ru; Nadezhda Ya. Poddubnaya: <https://orcid.org/0000-0001-9109-1363>, poddoubnaia@mail.ru, Maria O. Schukina: <https://orcid.org/0009-0009-2711-6050>, a89217334226@yandex.ru.