

НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ МЕЛКИМИ МЛЕКОПИТАЮЩИМИ НОРИЛО-ПЯСИНСКОЙ ЭКОСИСТЕМЫ

Р.Б. Чысыма, А.В. Прокудин, О.К. Сергеева

НИИ сельского хозяйства и экологии Арктики – филиал ФГБУ Федеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр Сибирского отделения РАН», Норильск, Россия

E-mail: norilskniiks@mail.ru

Для цитирования: Чысыма Р.Б., Прокудин А.В., Сергеева О.К. Накопление тяжелых металлов мелкими млекопитающими Норило-Пясинской экосистемы // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2024. – № 4(73). – С. 280–289. – DOI: 10.31677/2072-6724-2024-73-4-280-289.

Ключевые слова: Норило-Пясинская экосистема, мелкие млекопитающие, аккумуляция, печень, почки, тяжелые металлы, Норильский промышленный район, полуостров Таймыр.

Реферат. Изучены особенности накопления тяжелых металлов в паренхиматозных органах мелких млекопитающих Норило-пясинской экосистемы, испытывающей антропогенное воздействие предприятий Норильского горно-металлургического комплекса. Материал химического анализа – пробы печени и почек мелких млекопитающих, отловленных на участках, условно выделенных в три зоны в зависимости расположения от источников загрязнения: импактная, буферная и фоновая. В результате исследования выявили в печени животных импактных и буферных территорий значительные отклонения от фоновых значений свинца, кадмия и меди, за исключением цинка: где аккумуляция данного элемента значительно меньше. Так, в сравнении с фоновой зоной концентрация свинца и кадмия в 3,4–2,8 и 2,7–2,5 раза выше ($P < 0,01$), меди в 1,3 раза ($P < 0,05$). Наиболее выраженные отклонения от фоновых значений зафиксированы в почках животных, где концентрации тяжелых металлов на загрязненных территориях превышали фоновые значения: по Pb в 8,4–10,2 раза, Cd – 6,6–6,4; Cu – 1,3–1,25; Zn – в 2,3 раза. Достоверно высокое накопление тяжелых металлов в почках животных по сравнению с печенью указывает на ведущую роль почек как естественного фильтра организма. В целом максимальные значения тяжелых металлов в основных паренхиматозных органах животных можно объяснить близостью расположения обследованных местообитаний к источникам загрязнения. Переносимые воздушными массами выбросы предприятий ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» распределяются и накапливаются в виде поллютантов на территории полуострова Таймыр.

ACCUMULATION OF HEAVY METALS IN SMALL MAMMALS OF THE NORILO-PYASINSKY ECOSYSTEM

R.B. Chysyma, A.V. Prokudin, O.K. Sergeeva

Research Institute of Agriculture and Ecology of the Arctic – branch of the Federal State Budgetary Institution “Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Norilsk, Russia

E-mail: norilskniiks@mail.ru

Keywords: Norilsk-Pyasinsk ecosystem, small mammals, accumulation, liver, kidneys, heavy metals, Norilsk industrial region, Taimyr Peninsula.

Abstract. The features of the accumulation of heavy metals in the parenchymal organs of small mammals of the Norilo-Pyasinsk ecosystem, which is experiencing anthropogenic impact from the enterprises of the Norilsk mining and metallurgical complex, have been studied. The material of the chemical analysis is samples of the liver and kidneys of small mammals captured in areas conventionally divided into three zones, depending on the location of the sources of pollution: impact, buffer and background. As a result, the study revealed significant deviations from the background values of lead, cadmium and copper in the liver of animals in impact and buffer territories, with the exception of zinc, where the accumulation of this element is much less. Thus, in comparison with the background zone, the concentration of lead and cadmium was higher by 3.4–2.8 and 2.7–2.5 times ($P < 0.01$), copper, by 1.3 times ($P < 0.01$). The most pronounced deviations from the background values were recorded in the kidneys of animals, where the concentrations of heavy metals in contaminated areas exceeded the background values: for Pb by 8.4–10.2 times, Cd by 6.6–6.4 times, Cu by 1.3–1.25 times and Zn by 2.3 times. The significantly high accumulation of heavy metals in the kidneys of animals, compared to the liver, indicates the

leading role of the kidneys as an organ filter in the body. In general, the maximum values of heavy metals in the main parenchymal organs of animals can be explained by the proximity of the location of the surveyed habitats to sources of pollution. Emissions carried by air masses from the enterprises of the Polar Division of PJSC MMC Norilsk Nickel are distributed and accumulated in the form of pollutants on the territory of the Taimyr Peninsula.

В настоящее время в районах интенсивного промышленного производства существует высокий уровень накопления загрязняющих веществ, в среду обитания человека и объектов животного мира поступают особо токсичные вещества – ксенобиотики, появляется опасность возникновения техногенных катастроф [1–2]. В южной части Таймырского полуострова располагается Норильский промышленный район, относящийся к одним из самых больших в мире промышленных комплексов горной добычи и производства цветных металлов. Предприятия комплекса ежегодно осуществляют выбросы в атмосферу диоксида серы, фенолов и частиц тяжелых металлов. Масштабы настолько велики, что Норильск уже много лет числится в списке самых загрязненных городов планеты [3].

Норильский промышленный район с его мощной металлургией и комплексом горнодобывающих, строительных и энергетических предприятий, представляет собой очаг концентрированного техногенного воздействия, влияющего на все компоненты биосферы (воздушный и водный бассейны, почвенные горизонты, растительный и животный мир). Здесь высокая концентрация различных отравляющих веществ техногенной и естественной природы, накапливаемых там годами [4].

Проблема техногенного загрязнения территории Норильского промышленного района и не снижающееся негативное воздействие на экосистему определяет необходимость проведения исследований по динамике поступления и аккумуляции различных химических веществ в живых организмах.

К особо опасным загрязнителям природной среды относятся тяжелые металлы из-за их способности накапливаться в организме и постепенно перемещаться по пищевой цепочке до более высоких концентраций [5–8]. Несмотря на то, что большинство тяжелых металлов являются естественными компонентами окружающей среды, их биохимическое равновесие изменено в связи с антропогенной деятельностью, что оказывает негативное воздействие на среду обитания живых систем [9–12].

Концентрации тяжелых металлов в органах и тканях мелких наземных млекопитающих являются индикаторами загрязнения окружающей

среды. Из всех видов животных мелкие наземные млекопитающие – одна из наиболее доступных и изученных групп живых организмов [13]. Они имеют широкое распространение по земному шару, характеризуются короткой продолжительностью жизненного цикла, высокой скоростью воспроизводства, быстро реагируют и достаточно подтверждают накопление токсичных элементов [14]. Поэтому этих животных традиционно используют в качестве модельных объектов в экологических исследованиях, посвященных мониторингу наземных экосистем, подвергшихся антропогенному воздействию [15–18].

В условиях полуострова Таймыр, с его спецификой функционирования промышленных предприятий и комплексов, в разное время проводились исследования по выявлению содержания тяжелых металлов и специфике их аккумуляции в почве и кормовых растениях в 4-километровой зоне ГМК «Норильский никель» и районах Аваамской тундры в южной части полуострова [19–20]. Имеются данные состояния животного населения и оценка загрязнения тканей наземных позвоночных в зоне выбросов Норильского промышленного района [21].

Исследования накоплений тяжелых металлов в организме мелких млекопитающих в условиях Норильского промышленного района нами проведены впервые.

Цель работы – определить содержание тяжелых металлов (свинец, кадмий, медь, цинк) в печени и почках и изучить особенности аккумуляции этих металлов в органах мелких наземных млекопитающих, обитающих в различных биотипах Норило-Пясинской экосистемы в настоящий период.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения содержания химических элементов в печени и почках мелких наземных млекопитающих использовались материалы отловов в период 2020–2022 гг. на трех локальных участках, территориально относящихся к Норило-Пясинской экосистеме (рис. 1) и расположенных на разном удалении от промышленных объектов Норильского горно-металлургического комплекса.

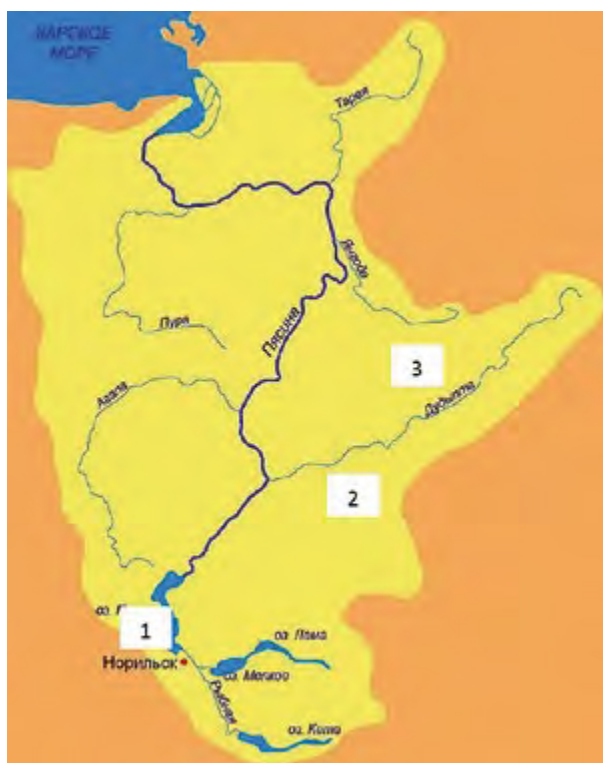


Рис. 1. Районы проведения исследований на территории Норило-Пясинской экосистемы:

Research areas in the Norilo-Pyasinsky ecosystem:

- 1 – район Оганер и Талнах г. Норильска (0,7–1,3 и 20,4 км.); 2 – район истока р. Пясины, правобережье залива Уловакентэ (62–86 км); 3 – район междуречья р. Нерпалах – Кыстыктак (268–291 км)
 1 – Oganer and Talnakh area of Norilsk (0.7–1.3 and 20.4 km); 2 – source area of the Pyasina River, right bank of the Ulovakente Bay (62–86 km); 3 – interfluve area of the Nerpalakh – Kystytak Rivers (268–291 km)

Район Оганер и Талнах г. Норильска, расположен непосредственно в пределах (0,7–1,3 и 20,4 м) предприятий ГК Норильского промышленного района и на близком расстоянии от предприятий ГК Норильск, отнесен к импактной зоне. Район истока р. Пясины на правобережье залива Уловакентэ расположен на удалении 62–86 м от предприятий Норильского промышленного района, отнесен к буферной зоне. Район междуречья р. Нерпалах – Кыстыктак (Центральный Таймыр), находится на значительном удалении (268–291 км) от зоны действия Норильского промышленного района, территория отнесена к фоновой зоне.

Для определения накопления тяжелых металлов в качестве объектов исследования выбраны мелкие млекопитающие: красно-серая полевка (*Clethrionomys rufocanu*), сибирская красно-серая полевка (*Clethrionomys rutilus Pal*), сибирский лемминг (*Lemmus sibiricus*) и насекомоядные – малая бурозубка (*Sorex minutus*). Материалом для исследований являлись пробы печени и почек мелких наземных млекопитающих из каждой

зоны (по 27). Животных отлавливали методом ловчих канавок [22–23]. Учет численности мелких млекопитающих животных проводили согласно руководству Ю.Н. Литвинова [24]. Видовую идентификацию, в том числе по одонтологическим показателям, проводили по определителю И.М. Громова и др. [25–26].

У отловленных животных производился забор внутренних органов (печень, почки). Анализы содержания тяжелых металлов в печени и почках проводили по ГОСТ Р 51301–99 «Продукты пищевые и продовольственное сырье», ГОСТ 33824–2016 «Инверсионно-вольтамперометрические методы определения содержания токсичных элементов (кадмия, свинца, меди и цинка) [27–28]. Нами проведен анализ среднего содержания ксенобиотиков (свинец и кадмий) и биогенных элементов (медь и цинк) в печени и почках мелких наземных млекопитающих, обитающих на различном расстоянии от металлургических и горнодобывающих предприятий Норильского промышленного района.

Химические анализы выполнены на базе химико-технологической лаборатории научно-исследовательского института сельского хозяйства и экологии Арктики ФКНЦ СО РАН (Норильск). Важно отметить, что нормативные показатели тяжелых металлов в органах мелких млекопитающих в доступной литературе отсутствуют, сравнительный анализ проведен в отношении показателей мелких млекопитающих условно благополучной территории (фоновая зона).

Статистическая обработка полученных данных проведена в программе Microsoft Excel с использованием пакета «Анализ данных». Достоверность различий определяли с использованием критерия достоверности Стьюдента, сравнивая каждую зону с фоновой отдельно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

У клинически здоровых животных химические элементы в организме играют важную

роль в осуществлении обменных процессов и в протекании различных физиолого-биохимических реакций, таких как иммунобиологическая активность и др. [29].

К наиболее токсичным химическим элементам относят свинец и кадмий. Превышение содержания этих элементов в живом организме приводит к их накоплению во внутренних органах, что оказывает негативное воздействие на весь организм. Медь и цинк относятся к числу эссенциальных элементов, превышение их концентрации в организме приводит к различным патологическим состояниям [30].

Свинец и кадмий являются отходами различных отраслей промышленности, токсическое воздействие которых представляет опасность для здоровья человека и животных [31–32].

Печень традиционно используется в качестве анализируемого субстрата, так как она является органом-депо для многих химических реакций [14]. В табл. 1 представлено содержание тяжелых металлов в печени мелких млекопитающих.

Таблица 1

Содержание тяжелых металлов в печени мелких млекопитающих, мг/кг
Heavy metal content in the liver of small mammals, mg/kg

Показатель	1 – импактная зона, <i>n</i> =27	2 – буферная зона, <i>n</i> =27	3 – фоновая зона, <i>n</i> =27
Pb	0,91±0,15	0,77±0,27	0,27±0,09
Cd	0,69±0,095	0,64±0,160	0,26±0,091
Cu	2,68±0,79	2,74±0,86	2,06±0,66
Zn	24,15±7,55	24,00±8,00	20,62±7,02

Уровень свинца в печени варьирует в значительных пределах у мелких млекопитающих различных зон Норило-Пясинской экосистемы. Наибольшая концентрация свинца выявлена в местообитаниях животных импактных и буферных участков, где его концентрация возрастает в 3,4 и 2,8 раза, или на 237 и 185 % ($P < 0,01$), по сравнению с фоновым показателем (0,27±0,09 мг/кг). Концентрация кадмия в печени имела сходную тенденцию, где максимум его концентрации в импактной и буферной территориях превышала в 2,7 и 2,5 раза таковую в фоновой зоне ($P < 0,01$).

Содержание меди в печени животных импактной и буферной зон на 1,3 раза, или в 30–33 % больше, чем на фоновой территории (2,06±0,66 мг/кг). Концентрация цинка в печени животных в импактной и буферной территориях

составляли 24,15±7,55 и 24,00±8,00 мг/кг, что больше в 1,2 раза, или на 16 и 17 %, по сравнению с животными фоновой участка. Основным источником цинкового загрязнения территорий является выброс в атмосферу этого металла тяжелой промышленностью при высокотемпературных технологических процессах [33].

Проведенный химический анализ содержания свинца в почках животных показал, что распределение этого элемента значительно варьирует, причем в импактной и буферной зоне его содержание в 8,4–10,2 раза превышало соответствующее значение для фоновой участка ($P < 0,01$). Концентрация кадмия в печени животных импактной и буферной зоны была больше в 6,6–6,4 раза, чем у животных фоновой зоны ($P < 0,01$) (табл. 2).

Таблица 2

Содержание тяжелых металлов в почках мелких млекопитающих, мг/кг
Heavy metal content in kidneys of small mammals, mg/kg

Показатель	1 – импактная зона, <i>n</i> =27	2 – буферная зона, <i>n</i> =27	3 – фоновая зона, <i>n</i> =27
Pb	8,27±2,1	10,05±3,16	0,98±0,31
Cd	1,91±0,42	1,86±0,57	0,29±0,10
Cu	8,81±2,52	8,25±2,73	6,60±2,28
Zn	101±29,50	102,00±33,50	43,43±14,71

При анализе содержания меди отмечается превышение его концентрации в почках у животных импактной и буферной зоны, где концентрация этого элемента составляла 8,81±2,52 и 8,25±2,73 мг/кг, что на 33 и 25 %, или в 1,3 и 1,25 раза, больше по сравнению с фоновыми показателями. В почках у животных импактной и буферной зон концентрация цинка составляла 101±29,50 и 102,00±33,50 мг/кг, у животных из фоновой зоны значение этого показателя было ниже на 132–134 % ($P < 0,01$).

Таким образом, у мелких млекопитающих и насекомых, обитающих в импактных и буферных территориях Норило-Пясинской экосистемы, в печени и почках отмечается максимальный уровень свинца, кадмия, меди и цинка в сравнении с животными, обитающими в фоновой территории. Высокие уровни тяжелых металлов в важнейших органах детоксикации организма животных можно объяснить следствием близости импактной и буферной зон к источнику загрязнения. Переносимые воздушными массами производственные выбросы предприятий ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» вносят значительный вклад в распределение и накопление поллютантов на территории Норило-Пясинской экосистемы полуострова Таймыр.

Данные, полученные нами о содержании свинца в почках мелких млекопитающих импактной и буферной зон, сочетаются с показателями уровня данного элемента, полученными Б.К. Калдыбаевым [34] на мышевидных грызунах в подверженных антропогенным нагрузкам техногенных зонах Приисыккуля. Автор указывал, что содержание свинца в почках наблюдалось в количестве 9,45 мг/кг.

Результаты, которые мы установили по накоплению кадмия в печени мышевидных гры-

зунов в импактной зоне, ниже, чем результаты Е.Л. Воробейчик и др., полученные на мелких млекопитающих Висимского заповедника (в своих исследованиях авторы приводят значение кадмия в печени –1,5 мг/кг). В почках установленное содержание этого элемента сочетается с данными вышеуказанных авторов [35].

Данные литературы по содержанию меди в печени (2,88–2,95 мг/кг) в целом согласуются с нашими результатами, а в почках концентрация данного элемента ниже (4,60–5,54 мг/кг) по сравнению с полученными нами результатами. По уровню цинка в печени (37,6–44,16) и в почках (71,03–103,32 мг/кг) наши данные расходятся с показателями, полученными Т.С. Улиговой, Ф.В. Хежевой на техногенно загрязненных территориях Центрального Кавказа [36].

Как известно, существует ярко выраженная индивидуальная вариабельность накопления отдельных химических элементов в организме животных [37]. При этом аккумуляция химических элементов значительно отличается в зависимости от вида паренхиматозного органа, о чем свидетельствуют результаты сравнительного анализа накоплений тяжелых металлов в печени и почках мелких наземных млекопитающих.

Распределение тяжелых металлов в печени и почках животных в загрязненных и фоновых территориях представлено на рис. 2–3. Высокие концентрации химических элементов в почках, по сравнению с печенью, были отмечены по всем химическим элементам. В почках установлена максимальная концентрация свинца, где уровень в 2,8–2,9 раза выше ($P < 0,01$), чем в печени. За ним следует кадмий, его концентрация в почках животных в 9,1 и 13,1 раза ($P < 0,01$) больше относительно печени (см. рис. 2).

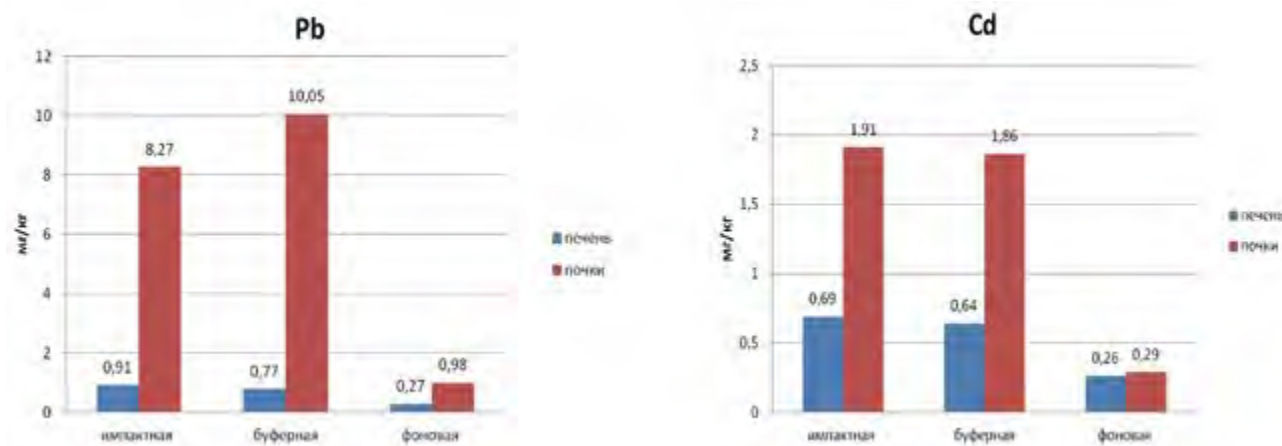


Рис. 2. Концентрация свинца и кадмия в печени и почках млекопитающих в импактной, буферной и фоновой зонах

Lead and cadmium concentrations in mammalian liver and kidneys in the impact, buffer and background zones

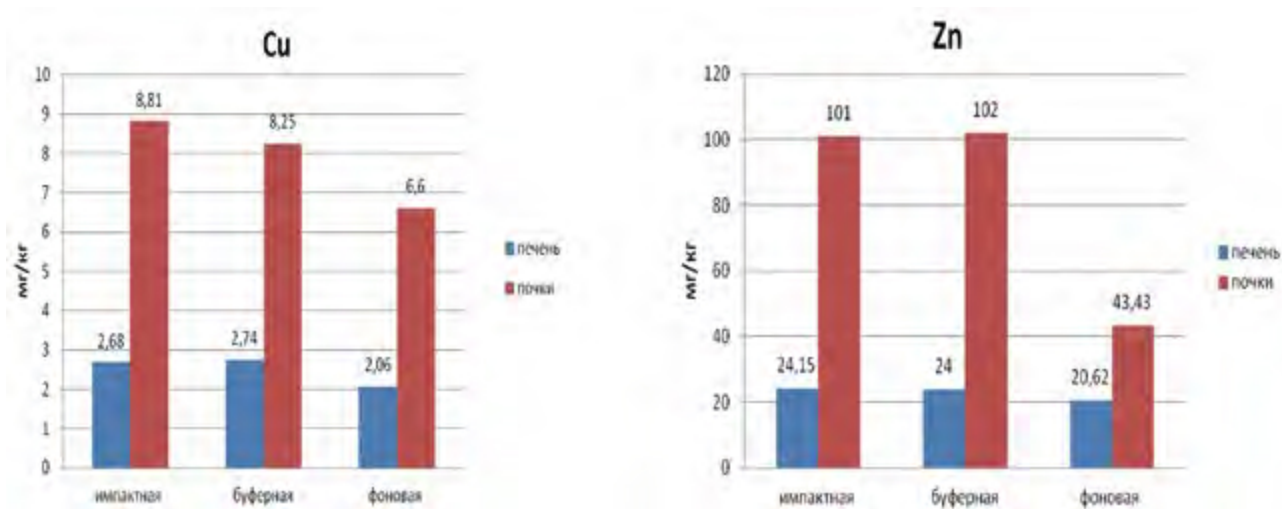


Рис. 3. Концентрация меди и свинца в печени и почках мелких млекопитающих в импактной, буферной и фоновой зонах

Copper and lead concentrations in liver and kidneys of small mammals in the impact, buffer and background zones

Сходные различия отмечались для меди и цинка, где концентрация меди в почках была выше в 3,3 и 10,3 раза ($P < 0,01$), цинка в 4,2 и 2,1 раза ($P < 0,01-0,05$) по сравнению с печенью (см. рис. 3).

Токсичные элементы (Pb, Cd) и эссенциальные металлы (Cu, Zn) максимально депонировались в почках мелких млекопитающих. Почки как орган – мишень для тяжелых металлов, они участвуют в фильтрации, реабсорбции и накоплении двухвалентных ионов, чрезмерное их накопление приводит к хроническому повреждению почек [38]. Таким образом, в почках выявлены превышения содержания свинца, кадмия, меди и цинка по сравнению с печенью ($P < 0,01$;

$P < 0,05$), что указывает на ведущую роль почек как естественного фильтра в живых организмах.

ВЫВОДЫ

1. Районы Норило-Пясинской экосистемы, находящиеся на разном удалении от границ Норильского промышленного района, характеризуются неоднородностью накопления тяжелых металлов. У мелких млекопитающих, обитающих в биотипах импактной и буферной зон, по сравнению с животными фоновой зоны наблюдалось повышение концентрации свинца в 3,4 и 2,8 раза, кадмия – 2,7 и 2,5 раза, меди и цинка в 1,3 и 1,2 раза.

2. Установлены различия в аккумуляции тяжелых металлов в печени и почках мелких млекопитающих. Во всех трех зонах в наиболее высоких концентрациях тяжелые металлы аккумуляровались в почках, что может объясняться как результат высокой чувствительностью клеток этого органа к токсическому воздействию тяжелых металлов.

3. Полученные данные могут использоваться как ориентировочные показатели содержания тяжелых металлов в печени и почках мелких млекопитающих и насекомых в условиях Норило-Пясинской экосистемы при проведении мониторинга состояния окружающей среды и объектов животного мира полуострова Таймыр.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Харина Г.В., Анахов С.В. Экологическая безопасность человека в техносфере. – Екатеринбург, 2023, 186 с.
2. Изучение элементного статуса населения различных промышленных районов как индикатора экологического загрязнения / А.Е. Побилат, А.А. Киричук, О.В. Баранова [и др.] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2023. – № 6. – С. 1–10. – DOI: 10.51419/202136619.
3. Природные условия и географическое положение Норильского промышленного узла. URL: <https://fb.ru/article/258629/prirodnyie-usloviya-i-geograficheskoe-polojenie-norilskogo-promyishlennogo-uzla>. (дата обращения 10.06.2024)
4. Нестеренко П.В., Зубалевич В.О. Экономическая и экологическая катастрофа в Норильске // Проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии: сб. ст. XXIII Междунар. науч.-практ. конф. «Города России». – Пенза, 2021. – С. 143–146.
5. Heavy metals concentration in the sediment of the aquatic environment caused by the leachate discharge from a landfill / L. Sulistyowati, N. Nurhasanah, E. Riani [et al.] // Global Journal of Environmental Science and Management. – 2023. – Vol. 9, N 2. – P. 323–336.
6. Biotransfer of heavy metals along the soil-plant-edible insect-human food chain in Africa / S. Mwelwa, D. Changu, F. Tailoka [et al.] // Science of The Total Environment. – 2023. – Vol. 881. – P. 163150. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163150.
7. The accumulation of heavy metals in feeder insects and their impact on animal production / E. Malematja, T.G. Manyelo, N.A. Sebola [et al.] // Science of the Total Environment. – 2023. – Vol. 885 – P. 163716.
8. Poopak H., Raeeszadeh M., Salimi B. Accumulation of heavy metals in meat and their relationship with water and food intake of aquatic animals in Kermanshah, western Iran // International Journal of Environmental Health Research. – 2024. – Vol. 34. – N 3. – P. 1453–1465.
9. Goswami R., Neog N. Heavy metal pollution in the environment: impact on air quality and human health implications // Heavy metal toxicity: Environmental concerns, remediation and opportunities. – Singapore: Springer Nature Singapore. – 2023. – P. 75–103.
10. Source, toxicity and carcinogenic health risk assessment of heavy metals / N.S. Budi, M.J. Catalan Oplencia, A. Afra [et al.] // Reviews on Environmental Health. – 2024. – Vol. 39, N 1. – P. 77–90.
11. Heavy metal contamination in water: consequences on human health and environment / A. Sharma, A.S. Grewal, D. Sharma [et al.] // Metals in water. – Elsevier, 2023. – P. 39–52.
12. Heavy Metals in the Ecosystem; Sources and Their Effects / A. Maftouh, O. El Fatni, A. Ben Moussa [et al.] // Heavy Metal Remediation: Sustainable Nexus Approach. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. – P. 27–44.
13. Мухачева С.В., Бердюгин К.И., Давыдова Ю.А. Опыт использования мелких млекопитающих для экспертной оценки состояния природных экосистем // Аграрный вестник Урала. – 2009. – № 3. – С. 65–68.
14. Степанова М.В., Остапенко В.А. Влияние загрязнения окружающей среды на накопления тяжелых металлов представителями семейства мышинные, содержащимися в искусственно созданных условиях // Актуальные вопросы зоологии, экологии и охраны природы: м-лы науч.-практ. конф. с междунар. участием. Вып. 2. – М., 2020. – С. 199–205.
15. Rodentia and Lagomorpha / S.R. SheffieldR., K. Sawicka-Kapusta, J.B. Cohen [et al.] // Ecotoxicology of Wild Mammals / Chichester – 2001. – P. 215–314.
16. Mukhacheva S.V. Long-Term Dynamics of Heavy Metal Concentrations in the Food and Liver of Shrews (g. Sorex) during High and Reduced Emissions Periods from the Copper Smelter // Russian Journal of Ecology. – 2022. – Vol. 53, N 5. – P. 381–395.
17. Demir F.T., Yavuz M. Heavy metal accumulation and genotoxic effects in levant vole (*Microtus guentheri*) collected from contaminated areas due to mining activities // Environmental pollution. – 2020. – Vol. 256. – P. 113378.
18. Heavy metals mixture affects the blood and antioxidant defense system of mice / A. Sani, A.I. Darma, I.L. Abdullahi [et al.] // Journal of Hazardous Materials Advances. – 2023. – Vol. 11. – P. 100340.

19. Оценка и нормирование экологического состояния почв в зоне деятельности предприятий металлургической компании «Норильский никель» А.С. Яковлев, О.И. Плеханова, С.В. Кудряшов [и др.] // Почвоведение. – 2008. – № 6. – С. 737–750.
20. Турчина Т.А., Янченко З.А. Оценка безопасности оленьих пастбищ Авамской тундры по содержанию тяжелых металлов в вегетативных органах растений // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2022. – Т. 27, № 2. – С. 246–257. – DOI: 10.31242/2618-9712-2022-27-2-246-257.
21. Шишкин А.С., Орешков Д.Н., Углова Е.С. Состояние животного населения в зоне воздействия Норильского промышленного комплекса // Сибирский экологический журнал. – 2014. – Т. 21, № 6. – С. 997–1008.
22. Наумов Н.П. Изучение подвижности и численности мелких млекопитающих с помощью ловчих канавок // Вопросы краевой, общей и экспериментальной паразитологии и медицинской зоологии. – М., 1955. – С. 179–202.
23. Юдин Б.С. Экология бурозубок (род *Sorex*) Западной Сибири // Тр. Биол. ин-та СО АН СССР. – 1962. – Вып. 8. – С. 33–134.
24. Литвинов Ю.Н. Сообщества и популяции мелких млекопитающих в экосистемах Сибири. – Новосибирск: Цэрис, 2001. – 126 с.
25. Млекопитающие фауны СССР / И.М. Громов, А.А. Гуреев, Г.А. Новиков [и др.]. – Издательство Академии наук СССР. Ч. 1. – М.; Л., 1963. – 640 с.
26. Бородин А.В. Определитель зубов полевок Урала и Западной Сибири (поздний плейстоцен – современность). – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 100 с.
27. МУ 31-04/04. Определение цинка, кадмия, свинца и меди в пищевой продукции. ФР.1.31.2004.00986 «Методика выполнения измерений массовой концентрации цинка, кадмия, свинца и меди в пищевых продуктах, продовольственном сырье, кормах и продуктах их переработки методом инверсионной вольтамперометрии на анализаторах типа ТА» (свид. об аттестации № 31-04/04 от 26.12.2003).
28. МУ 31-05/04. Определение мышьяка в пищевой продукции. ФР.1.31.2004.01119 «Методика выполнения измерений массовой концентрации мышьяка в пищевых продуктах и продовольственном сырье, биологически активных добавках к пище методом инверсионной вольтамперометрии на анализаторах типа ТА» (свид. об аттестации № 31-05/04 от 17.02.2004).
29. Элементный статус крови крупного рогатого скота голштинской породы в биогеохимических условиях Кемеровской области / Н.И. Шишин, О.И. Себежко, Ю.И. Федяев [и др.] // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2017. – № 3. – С. 70–79.
30. Полянская И.С. Новая классификация биоэлементов в биоэлементологии // Молочно-хозяйственный вестник. – 2014. – № 1 (13). – С. 34–42.
31. Raj K., Das A. P. Lead pollution: Impact on environment and human health and approach for a sustainable solution // Environmental Chemistry and Ecotoxicology. – 2023. – Vol. 5. – С. 79–85.
32. Kuna G., Gullipalli S., Chintada V. Health Risks Associated with Cadmium Toxicity // Cadmium Toxicity in Water: Challenges and Solutions. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. – P. 47–60.
33. Скальный А.В., Рудаков И.А. Биоэлементы в медицине. – М.: Мир, 2004. – 272 с.
34. Калдыбаев Б.К. Уровни накопления тяжелых металлов мышевидными грызунами Прииссыкуля // Известия вузов (Кыргызстан). – 2011. – № 1. – С. 43–46.
35. Исследование мелких млекопитающих Висимского заповедника: вклад в популяционную экотоксикологию? / Е.Л. Воробейчик, Ю.А. Давыдова, С.Ю. Кайгородова, С.В. Мухачева // Результаты изучения природы Висимского биосферного заповедника: науч. сб. ИЭРиЖ УрОРАН. Екатеринбург, 2006. – С. 108–129.
36. Улигова Т.С., Хежева Ф.В. Тяжелые металлы в компонентах природной среды в условиях техногенного загрязнения среднегорий Центрального Кавказа // Экологический вестник Северного Кавказа. – 2008. – Т. 4, № 3. – С. 12–18.
37. Гаевая Е.В., Захарова Е.В. Содержание тяжелых металлов в организме крупного рогатого скота // Ползуновский вестник. – 2011. – № 4–2. – С. 119–21.
38. Нарожных К.Н. Особенности аккумуляции тяжелых металлов в почках герефордского скота Западной Сибири // Аграрная наука – сельскохозяйственному производству Сибири, Казахстана, Монголии, Беларуси и Болгарии: сб. науч. докл. XX Междунар. науч.-практ. конф. – Ч. 1. – Новосибирск, 2017. – С. 422–426.

REFERENCES

1. Kharina G.V., Anakhov S.V., *Ekologicheskaya bezopasnost' cheloveka v tekhnosfere* (Environmental safety of man in the technosphere), Yekaterinburg, 2023, 186 p.
2. Pobilat A.Ye., Kirichuk A.A., Baranova O.V. [i dr.], *AgroEkoInfo: elektronnyy nauchno-proizvodstvennyy zhurnal*, 2023, No. 6, pp. 1–10-DOI: 10.51419/202136619. (In Russ)

3. *Prirodnyye usloviya i geograficheskoye polozheniye Noril'skogo promyshlennogo uzla* (Natural conditions and geographical location of the Norilsk industrial hub), URL: <https://fb.ru/article/258629/prirodnyie-usloviya-i-geograficheskoe-polozhenie-noril'skogo-promyshlennogo-uzla>. (In Russ)
4. Nesterenko P.V., Zubalevich V.O., *Problemy stroitel'stva, inzhenernogo obespecheniya, blagoustroystva i ekologii* (Problems of construction, engineering, improvement and ecology), Proceedings of the Conference Title, Penza, 2021, pp. 143–146. (In Russ)
5. Sulistyowati L., Nurhasanah N., Riani E. [et al.], Heavy metals concentration in the sediment of the aquatic environment caused by the leachate discharge from a landfill, *Global Journal of Environmental Science and Management*, 2023, Vol. 9, No. 2, pp. 323–336.
6. Mwelwa S., Chungu D., Tailoka F. [et al.], Biotransfer of heavy metals along the soil-plant-edible insect-human food chain in Africa, *Science of The Total Environment*, 2023, Vol. 881, pp. 163150, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163150.
7. Malematja E., Manyelo T.G., Sebola N.A. [et al.], The accumulation of heavy metals in feeder insects and their impact on animal production, *Science of the Total Environment*, 2023, Vol. 885, pp. 163716.
8. Poopak H., Raeeszadeh M., Salimi B., Accumulation of heavy metals in meat and their relationship with water and food intake of aquatic animals in Kermanshah, western Iran, *International Journal of Environmental Health Research*, 2024, Vol. 34, No. 3, pp. 1453–1465.
9. Goswami R., Neog N., Heavy metal pollution in the environment: impact on air quality and human health implications, Heavy metal toxicity: *Environmental concerns, remediation and opportunities*, Singapore: Springer Nature Singapore, 2023, pp. 75–103.
10. Budi N.S., Catalan Opulencia M.J., Afra A. [et al.], Source, toxicity and carcinogenic health risk assessment of heavy metals, *Reviews on Environmental Health*, 2024, Vol. 39, No. 1, pp. 77–90.
11. Sharm A., Grewal A.S., Sharma D. [et al.], Heavy metal contamination in water: consequences on human health and environment, *Metals in water*, Elsevier, 2023, pp. 39–52.
12. Maftouh A., El Fatni O., Ben Moussa A. [et al.], Heavy Metals in the Ecosystem; Sources and Their Effects, *Heavy Metal Remediation: Sustainable Nexus Approach*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 27–44.
13. Mukhacheva S.V., Berdyugin K.I., Davydova YU.A., *Agrarnyy vestnik Urala*, 2009, No. 3, pp. 65–68. (In Russ)
14. Stepanova M.V., Ostapenko V.A., *Aktual'nyye voprosy zoologii, ekologii i okhrany prirody* (Current issues in zoology, ecology and nature conservation), Proceedings of the Conference Title, 2020, Vol. 2, pp. 199–205. (In Russ.)
15. Sheffield R.S.R., Sawicka-Kapusta K., Cohen J.B. [et al.], Rodentia and Lagomorpha, *Ecotoxicology of Wild Mammals*, Chichester: England, 2001, pp. 215–314.
16. Mukhacheva S.V., Long-Term Dynamics of Heavy Metal Concentrations in the Food and Liver of Shrews (g. Sores) during High and Reduced Emissions Periods from the Copper Smelter, *Russian Journal of Ecology*, 2022, Vol. 53, No. 5, pp. 381–395.
17. Demir F.T., Yavuz M., Heavy metal accumulation and genotoxic effects in levant vole (*Microtus guentheri*) collected from contaminated areas due to mining activities, *Environmental pollution*, 2020, Vol. 256, pp. 113378.
18. A Sani A., Darma F.L., Abdullahi I.L. [et al.], Heavy metals mixture affects the blood and antioxidant defense system of mice, *Journal of Hazardous Materials Advances*, 2023, Vol. 11, pp. 100340.
19. Yakovlev A.S., Plekhanova O.I., Kudryashov S.V. [i dr.], *Pochvovedeniye*, 2008, No. 6, pp. 737–750. (In Russ.)
20. Turchina T.A., Yanchenko Z.A., *Prirodnyye resursy Arktiki i Subarktiki*, 2022, Vol. 27, No. 2, pp. 246–257, DOI: 10.31242/2618-9712-2022-27-2-246-257. (In Russ.)
21. Shishikin A.S., Oreshkov D.N., Uglova Ye.S., *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*, 2014, Vol. 21, No. 6, pp. 997–1008. (In Russ.)
22. Naumov N.P., *Voprosy krayevoy, obshchey i eksperimental'noy parazitologii i meditsinskoy zoologii*, Moscow, 1955, pp. 179–202. (In Russ.)
23. Yudin B.S., *Trudy. Biol. in-ta SO AN SSSR*, 1962, Vyp. 8, pp. 33–134. (In Russ)
24. Litvinov YU.N., *Soobshchestva i populyatsii melkikh mlekopitayushchikh v ekosistemakh Sibiri* (Communities and populations of small mammals in the ecosystems of Siberia), Novosibirsk: Tseris, 2001, 126 p.
25. Gromov I.M., Gureyev A.A., Novikov G.A. [i dr.], *Mlekopitayushchiye fauny SSSR* (Mammals of the fauna of the USSR), Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR, Chast' 1, Moscow; Leningrad, 1963, 640 p. (In Russ.)
26. Borodin A.V., *Opredelitel' zubov polevok Urala i Zapadnoy Sibiri (pozdniy pleystotsen – sovremennost')* (A guide to the teeth of voles in the Urals and Western Siberia (late Pleistocene – modern times)), Yekaterinburg: UrO RAN, 2009, 100 p.
27. MU 31-04/04 *Opredeleniye tsinka, kadmiya, svintsa i medi v pishchevoy produkcii*. FR.1.31.2004.00986 «Metodika vypolneniya izmereniy massovoy kontsentratsii tsinka, kadmiya, svintsa i medi v pishchevykh produktakh, prodovol'stvennom syr'ye, kormakh i produktakh ikh pererabotki metodom inversionnoy vol'tamperometrii na analizatorakh tipa TA» (svidetel'stvo ob attestatsii №31-04/04 ot 26.12.2003 g.). (In Russ)
28. MU 31-05/04 *Opredeleniye mysh'yaka v pishchevoy produkcii*. FR.1.31.2004.01119 «Metodika vypolneniya izmereniy massovoy kontsentratsii mysh'yaka v pishchevykh produktakh i prodovol'stvennom syr'ye, biologicheski ak-

- tivnykh dobavkakh k pishche metodom inversionnoy vol'tamperometrii na analizatorakh tipa TA» (svidetel'stvo ob attestatsii №31-05/04 ot 17.02.04 g.). (In Russ.)
29. Shishin N.I., Sebezhko O.I., Fedayev YU. I. [i dr.], *Vestnik NGAU (Novosibirskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet)*, 2017, No. 3, pp. 70–79. (In Russ.)
 30. Polyanskaya I.S., *Molochno-khozyaystvennyy vestnik*, 2014, No. 1 (13), pp. 34–42. (In Russ.)
 31. Raj K., Das A.P., Lead pollution: Impact on environment and human health and approach for a sustainable solution, *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 2023, Vol. 5, pp. 79–85.
 32. Kuna G., Gullipalli S., Chintada V., Health Risks Associated with Cadmium Toxicity, *Cadmium Toxicity in Water: Challenges and Solutions*, Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 47–60.
 33. Skal'nyy A.V., Rudakov I.A., *Bioelementy v meditsine* (Bioelements in medicine), Moscow: Mir, 2004, 272 p.
 34. Kaldybayev B.K., *Izvestiya VUZov (Kyrgyzstan)*, 2011, No. 1, pp. 43–46. (In Russ.)
 35. Vorobeychik Ye.L., Davydova YU.A., Kaygorodova S.YU., Mukhacheva S.V., *Rezul'taty izucheniya prirody Visim-skogo biosfernogo zapovednika: nauch. sb. IERiZH UrORAN*, Yekaterinburg, 2006, pp. 108–129. (In Russ.)
 36. Uligova T.S., Khezheva F.V., *Ekologicheskiy vestnik Severnogo Kavkaza*, 2008, Vol. 4, No. 3, pp. 12–18. (In Russ.)
 37. Gayevaya Ye.V., Zakharova Ye.V., *Polzunovskiy vestnik*, 2011, No. 4–2, pp. 119–121. (In Russ.)
 38. Narozhnykh K.N., *Agrarnaya nauka-sel'skokhozyaystvennomu proizvodstvu Sibiri, Kazakhstana, Mongolii, Belarusi i Bolgarii* (Agricultural science – agricultural production in Siberia, Kazakhstan, Mongolia, Belarus and Bulgaria), Proceedings of the Conference Title, 2017, pp. 422–426. (In Russ.)

Информация об авторах:

Р.Б. Чысыма, доктор биологических наук
 А.В. Прокудин, кандидат ветеринарных наук
 О.К. Сергеева, научный сотрудник

Contribution of the authors:

R.B. Chysyma, Doctor of Biological Sciences
 A.V. Prokudin, Candidate of Veterinary Sciences
 O.K. Sergeeva, Researcher

Вклад авторов:

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.