

Оригинальная статья

УДК 575.17:599.323.42

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2025-4-381-391>

СЕЗОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЫШЬЯКА В ТКАНЯХ ПОЛЕВЫХ МЫШЕЙ (*APODEMUS AGRARIUS* PALLAS, 1771) (MURIDAE, RODENTIA), ОБИТАЮЩИХ В ПАРКАХ г. МОСКВЫ

В. В. Беленкова¹, Т. Н. Карманова¹, Д. Г. Селезнев²,
А. В. Суров¹, Н. Ю. Феоктистова^{1✉}

¹ Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН

Россия, 119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 33

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

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

Поступила в редакцию 19.04.2025 г., после доработки 17.05.2025 г., принята 20.05.2025 г., опубликована 17.12.2025 г.

Аннотация. В своей предыдущей работе (Belenkova et al., 2025) мы исследовали накопление тяжелых металлов в органах и тканях полевых мышей в весенний период. Данные о сезонных особенностях биоаккумуляции противоречивы. Мы повторили работу на выборках полевых мышей, отловленных осенью, и сравнили полученные данные с весенними. Показано, что в целом концентрация тяжелых металлов (особенно Pb) весной превышает осенние показатели. При этом особенности накопления ТМ в тканях зверьков в конкретных парках сохранились, т.е. наиболее загрязненным остался Филевский парк, а наиболее чистым – Останкинский. Полученные результаты в перспективе могут быть использованы для создания тест-систем, позволяющих проводить комплексную оценку экологического состояния городских экосистем с учетом сезонной и пространственной динамики циркуляции тяжелых металлов в окружающей среде и в организме свободноживущих видов.

Ключевые слова: урбоценоз, тяжёлые металлы, мышьяк, сезонные различия, экологическое состояние

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-24-20023).

Соблюдение этических норм. Протоколы с использованием животных были одобрены Комиссией по биоэтике Института проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН (протокол № 226 от 04.03.2024 г.).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

✉ Для корреспонденции. Лаборатория сравнительной этологии и биокоммуникации Института проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН.

ORCID и e-mail адреса: Беленкова Валерия Викторовна: <https://orcid.org/0009-0008-5634-0115>, vbelenkova@yandex.ru; Карманова Татьяна Николаевна: <https://orcid.org/0000-0001-9287-5928>, karmannovs94@mail.ru; Селезнев Дмитрий Геннадьевич: <https://orcid.org/0000-0003-2782-1696>, dmitriy@seleznev.name; Суров Алексей Васильевич: <https://orcid.org/0000-0003-2030-8910>, surov@sevin.ru; Феоктистова Наталья Юрьевна: <https://orcid.org/0000-0003-4010-2880>, feoktistovanyu@gmail.com.

Для цитирования. Беленкова В. В., Карманова Т. Н., Селезнев Д. Г., Суров А. В., Феоктистова Н. Ю. Сезонные особенности накопления тяжелых металлов и мышьяка в тканях полевых мышей (*Apodemus agrarius* Pallas, 1771) (Muridae, Rodentia), обитающих в парках г. Москвы // Поволжский экологический журнал. 2025. № 4. С. 381 – 391. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2025-4-381-391>

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение мегаполисов тяжелыми металлами (ТМ) – серьезная экологическая проблема, которая требует постоянного и пристального внимания (Nasrabadi et al., 2010; Başlar et al., 2011; Ahmad et al., 2018; Zhang et al., 2023). Как одна из основных групп поллютантов, они представляют угрозу окружающей среде и здоровью человека, поскольку могут длительное время сохраняться в почве, накапливаться в организме животных и тканях растений, следуя каскадным эффектам по пищевым цепям (Clemens, Ma, 2016; Zaynab et al., 2022; Cui et al., 2024). Очевидно, что наиболее сильно загрязнение ТМ должно проявляться в городах с интенсивным движением транспорта и вблизи крупных объектов промышленного производства. При этом анализа воды, почвы и воздуха по отдельности недостаточно для адекватной оценки опасности таких веществ для здоровья человека и животных (Talmage, Walton, 1991). Поэтому важно проводить мониторинг состояния окружающей среды с участием диких животных, обитающих рядом с человеком (Beernaert et al., 2007). Показано, что мелкие млекопитающие и, в частности, грызуны служат чувствительными биоиндикаторами воздействия загрязняющих веществ на окружающую среду (Beernaert et al., 2007; Zarrintab, Mirzaei, 2017; Ecke et al., 2020). Мелких наземных млекопитающих (таких как землеройки, полевки и мыши) успешно используют в биомониторинге и эко-токсикологических исследованиях (Al Sayegh Petkovsek et al., 2014). Они более восприимчивы к воздействию поллютантов из-за небольших размеров тела и высокой скорости метаболизма (Levengood, Heske, 2008). Количество исследований по биоаккумуляции ТМ и их токсическому воздействию на организм животных, в том числе мелких млекопитающих, постоянно растет. Считается, что мелкие млекопитающие, используемые в качестве видов-биоиндикаторов, должны соответствовать следующим критериям (Komarnicki, 2000): 1) высокая численность в урбанизированных зонах; 2) низкий уровень миграции и небольшие участки обитания, что позволяет выявлять особенности локальных источников загрязнений (Flickinger, Nichols, 1990). Миграция может маскировать негативные последствия загрязнения окружающей среды (Wren, 1986); 3) высокая относительная продолжительность жизни для оценки возможных долгосрочных последствий, например, накопления ТМ или нарушений здоровья в результате длительного воздействия.

Полевые мыши (*Apodemus agrarius* Pallas, 1771), обитающие во всех парках г. Москвы, удовлетворяют по крайней мере двум из указанных условий. Для них характерны относительно небольшие участки обитания (около 2400 м²) и невысокая миграционная активность, что является важным для сравнения экологической обстановки в разных районах города (Tikhonova et al., 2012). Последние четверть

СЕЗОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

века полевая мышь стала абсолютным доминантом на незастроенных территориях города.

В своей предыдущей работе (Belenkova et al., 2025) мы исследовали уровень загрязнения ТМ органов и тканей полевых мышей в весенний период. Мы показали, что средние концентрации большинства ТМ в тканях животных, обитающих в исследованных парках, достоверно различаются. Больше всего они накапливаются в шерсти, меньше – в мышцах, печени и костях. Наименее загрязненным по показателям биоаккумуляции в шерсти, мышцах и печени оказался наиболее удаленный от центра города Терлецкий парк. Таким образом, биоаккумуляция ТМ происходит по-разному в тканях и органах свободноживущих полевых мышей, при этом расстояние от центра города не всегда отражается на этом показателе. Однако за рамками исследования остался вопрос сезонных особенностей биоаккумуляции ТМ в организме полевых мышей. В ряде работ показано, что сезон может влиять на уровень воздействия загрязняющих веществ. Например, исследование накопления полихлорированных дibenзо-*p*-диоксинов и дibenзофуранов (ПХДД/Ф) в Москве (в окрестностях полигона Саларьево) у рыжих полевок (*Myodes glareolus*) показало повышенное содержание этих загрязнителей у осенних зверьков по сравнению с весенними (Roumak et al., 2022). Однако комплексный анализ 69 элементов и 50 органических соединений у тех же рыжих полевок в пяти зонах мониторинга, охватывающих три биогеографических региона Швеции (в рамках Шведской национальной программы мониторинга окружающей среды мелких грызунов (NEMPSR)), показал иную картину. Концентрации ТМ и органических загрязнителей у взрослых особей рыжих полевок изменялись в зависимости от сезона, при этом большинство концентраций органических загрязнителей и ТМ были выше весной, что, скорее всего, вызвано изменениями в рационе питания и/или возрастными различиями (Ecke et al., 2020).

Цель настоящего исследования – оценить сезонные особенности накопления ТМ (Fe, Mn, Zn, Sr, Ni, Pb, Cr, Cu) и металлоида As в разных органах и тканях полевых мышей, обитающих в четырех парках г. Москвы, расположенных в разных зонах урбанизации.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Сбор материала проводили в сентябре – октябре 2024 г. в четырех парках г. Москвы, расположенных в нескольких зонах урбанизации, по классификации Г. Н. Тихоновой с соавторами (Tikhonova et al., 2012): Нескучный сад (III зона урбанизации), Останкинский парк (IV зона урбанизации), Филёвский парк (V зона урбанизации), Терлецкий парк (VI зона урбанизации).

Отлов грызунов и пробоподготовка образцов проводились аналогично указанным в статье В. В. Беленковой с соавторами (Belenkova et al., 2025). Всего было собрано 160 образцов от 40 особей полевой мыши. Качественный и количественный анализ образцов проводился в лаборатории экологического мониторинга регионов АЭС и биоиндикации Института проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН на энергодисперсионном TXRF спектрометре S2 PicoFox (Bruker, Германия) по методике ISO/TS 18705:2015 (Surface chemical analysis – Use of Total Reflection X-ray Fluorescence spectroscopy in biological and environmental analysis).

Статистическая обработка результатов. Для разведочного анализа совместного накопления химических элементов в образцах использовали корреляцию Пирсона. Для установления особенностей накопления ТМ и As органами и различий по паркам применялся перестановочный ковариационный анализ с 10000 перестановками на каждое сравнение и факторами «парк» и «орган» в качестве ковариат соответственно. В качестве метода снижения размерности многомерной матрицы накопления металлов использовали анализ главных компонент (Principal Component Analysis – PCA) на стандартизированных данных. Расчёты проводили в среде статистического анализа R 4.2 (R Core Team, 2023) с использованием пакетов vegan (Oksanen et al., 2012), permuco (Frossard, Renaud, 2019).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В органах и тканях полевых мышей в осенний период установлена сильная коррелированность следующих элементов: Cr, Mn, Fe, Cu и Zn (коэффициент корреляции $0.66 < r < 0.89$). С ними слабее положительно связаны Sr и Pb ($0.25 < r < 0.57$). Накопление As очень слабо связано с накоплением Cr, Cu и Pb ($0.2 < r < 0.24$), а накопление Ni положительно коррелирует только с накоплением Cu ($r = 0.31$) (рис. 1).

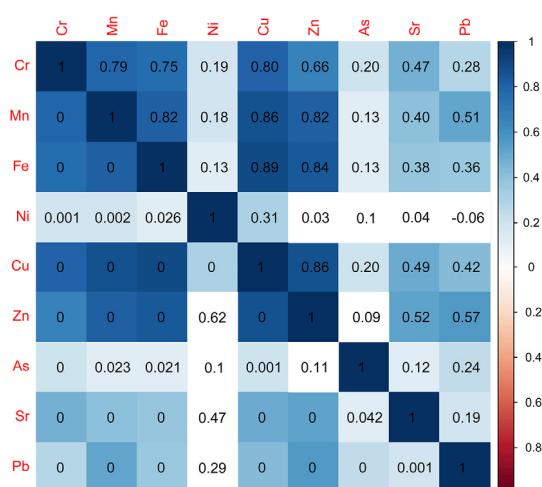


Рис. 1. Корреляции накопления химических элементов в тканях полевых мышей в осенне время. Выше диагонали приведены коэффициенты корреляции, ниже – уровень их значимости. Белым фоном показаны статистически незначимые коэффициенты

Fig. 1. Correlations of the accumulation of chemical elements in the tissues of stripped field mice in the autumn. The correlation coefficients are displayed above the diagonal, with their respective significance levels shown below. Statistically insignificant coefficients are shown with a white background

Различия в накоплении ТМ и As в органах и тканях полевых мышей с параметром «парки» в качестве ковариаты представлены в табл. 1. Анализ подтвердил, что большинство ТМ накапливается в шерсти зверьков. Сравнение по сезонам показало, что в костях полевых мышей накопление Mn, Fe, As и Pb было достоверно выше весной, а Zn, напротив, осенью. В мышцах содержание ТМ в весенних выборках также оказалось более высоким, чем в осенних по всем элементам, кроме Cr и Mn, по которым оно по сезонам не различалось. Интересно, что именно эти два элемента в шерсти содержались в достоверно большем количестве как раз осенью. В то же время концентрация Pb была достоверно более высокой во всех органах и тканях именно весной.

Когда в качестве ковариаты были взяты органы, то есть срав-

СЕЗОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

нение велось только по паркам без учета накопления в органах и тканях, результаты получились следующими. В Нескучном саду эффект накопления всех элементов, кроме Mn, Sr и Ni, сильнее проявлялся в весенне время. По Останкинскому парку достоверные отличия между весенними и осенними выборками были получены только для Pb: его концентрация была достоверно более высокой также весной. Однако в Филевском парке достоверно более высокие концентрации Cr и Sr обнаружены в осенне время, а Pb и As – в весенне. Остальные значения достоверно не отличались, но содержание большинства практически всех ТМ в Филевском парке было выше, чем в других парках независимо от сезона года (табл. 2).

Таблица 1. Накопление тяжелых металлов и мышьяка в исследованных органах и тканях полевых мышей в разные сезоны года

Table 1. Accumulation of heavy metals and arsenic in the studied organs and tissues of striped field mice in different seasons of the year

Ткань, орган / Tissue, organ	Сезон / Season	Химический элемент / Chemical elements								
		Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Pb
Кости / Bones	par p-value	0.0663	0	0.0025	0.0972	0.1112	0.0012	0.0022	0.089	0.0074
	perm p-value	0.0623	<0.0001	0.0017	0.099	0.1104	0.001	0.0014	0.0852	0.0005
	Осень / Autumn	0.25	0.51	51.17	0.11	3.29	35.97	0.002	18.32	0.12
	Весна / Spring	0.36	1.45	57.02	0.09	2.66	31.24	0.0056	17.04	0.28
Шерсть / Fur	par p-value	0.0002	0.0426	0.5253	0.2855	0.9461	0.7524	0.0884	0.1529	0.0111
	perm p-value	0.0002	0.0386	0.5353	0.2889	0.9449	0.769	0.0843	0.1579	0.009
	Осень / Autumn	1.98	6.33	218.69	0.10	16.35	233.76	0.0043	20.08	1.05
	Весна / Spring	1.17	5.7	224.78	0.12	16.30	236.59	0.0087	18.55	1.43
Печень / Liver	par p-value	0.0069	0.1125	0.14	0.6734	0.0476	0.0014	0.8391	0.1441	0.033
	perm p-value	0.003	0.1149	0.15	0.8229	0.0451	0.0011	0.9045	0.1515	0.0285
	Осень / Autumn	0.074	1.46	128.27	0.04	4.44	49.26	0.0037	1.90	0.14
	Весна / Spring	0.04	1.22	121.53	0.06	5.06	52.01	0.0031	2.10	0.21
Мышцы / Muscles	par p-value	0.5103	0.0987	0.0001	0	0	0	0.0379	0	0.0001
	perm p-value	0.5221	0.1022	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0374	0.0001	0.0003
	Осень / Autumn	0.14	0.56	27.34	0.09	2.91	10.50	0.0056	3.19	0.27
	Весна / Spring	0.12	0.72	33.10	0.24	4.30	13.12	0.0097	4.20	0.53

Примечание. par p-value – параметрический уровень значимости, perm p-value – перестановочный уровень значимости. В строках «Осень» и «Весна» приведены размеры эффекта – средние значения накопления элемента в ткани, нормированные на ковариату «парк». Жирным шрифтом выделены максимальные значения там, где различия значимы.

Note. par p-value is the parametric significance level, and perm p-value is the permuted significance level. The effect sizes are shown in the “Autumn” and “Spring” lines: the average values of accumulation of each element in the tissue, normalized to the covariate of the “park”. The maximum values are highlighted in bold where the differences are significant.

Анализ РСА располагает образцы в пространстве двух главных компонент, суммарно объясняющих 66.3% дисперсии признаков (рис. 2). Он позволяет визуально оценить зависимость накопления ТМ от трех параметров образцов: «сезона», «парка» и «ткани». Ось абсцисс (53.9% дисперсии) обратно пропорциональна накоплению группе высоко скоррелированных металлов: Cu, Fe, Mn, Cr, Zn, и, в меньшей степени, Sr. По этой компоненте максимальные значения имеет их накопление в шерсти в парке Фили в оба сезона, повышенные – в шерсти в Терлецком парке осенью и в Нескучном саду весной. Ось ординат (12.4% дисперсии) имеет существенно меньшее значение и обратно пропорциональна накоплению Ni.

Таблица 2. Накопление химических элементов суммарно во всех исследованных тканях и органах полевых мышей в 4 парках г. Москвы в разные сезоны года**Table 2.** Accumulation of chemical elements in total in all studied tissues and organs of striped field mice in the four parks in different seasons of the year

Местоположение / Location	Сезон / Season	Химический элемент / Chemical elements								
		Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Pb
Филёвский парк / Filevsky Park	par p-value	0.0029	0.33	0.9866	0.6753	0.6004	0.4705	0.0203	0.0062	0.001
	perm p-value	0.0015	0.341	0.9885	0.674	0.6091	0.4975	0.019	0.0032	0.0003
	Осень / Autumn	1.33	3.77	164.39	0.33	12.11	98.67	0.005	14.58	0.29
	Весна / Spring	0.89	3.56	164.53	0.34	11.85	101.61	0.007	11.53	0.46
Нескучный сад / Neskuchny Garden	par p-value	0.0009	0.3267	0.0001	NA	0	0.0001	0.0145	0.4719	0
	perm p-value	0.001	0.3293	0.0001	NA	0.0001	0.0001	0.0116	0.4895	0.0001
	Осень / Autumn	0.25	1.15	89.44	0	4.83	95.17	0.0052	11.12	0.22
	Весна / Spring	0.39	1.25	107.28	0	6.65	110.14	0.0125	11.47	0.76
Останкинский парк / Ostankino Park	par p-value	0.9764	0.1033	0.1572	0.3449	0.2162	0.5005	0.528	0.9424	0.0012
	perm p-value	0.9807	0.105	0.1564	0.4374	0.2151	0.5043	0.5324	0.946	0.0009
	Осень / Autumn	0.10	1.56	84.21	0.02	5.51	63.52	0.0005	11.19	0.48
	Весна / Spring	0.10	1.69	86.74	0.06	4.95	65.21	0.0008	11.23	0.71
Терлецкий парк / Terletsky Park	par p-value	0.0032	0.5822	0.098	0.0008	0.7379	0.0097	0.5201	0.4495	0.2294
	perm p-value	0.0028	0.5793	0.0952	0.0005	0.7492	0.0008	0.6145	0.4521	0.2342
	Осень / Autumn	1.02	2.98	97.41	0.039	5.93	85.15	0.0043	9.60	0.65
	Весна / Spring	0.38	3.21	86.21	0.145	5.70	64.09	0.0061	10.06	0.52

Примечание. par p-value – параметрический уровень значимости, perm p-value – перестановочный уровень значимости. В строках «Осень» и «Весна» приведены размеры эффекта – средние значения накопления элемента в ткани, нормированные на ковариату «ткань». Жирным шрифтом выделены максимальные значения там, где различия значимы.

Note. par p-value is the parametric significance level, and perm p-value is the permuted significance level. The effect sizes are shown in the “Autumn” and “Spring” lines: the average values of accumulation of each element in the park, normalized to the covariate of the “tissue”. The maximum values are highlighted in bold where the differences are significant.

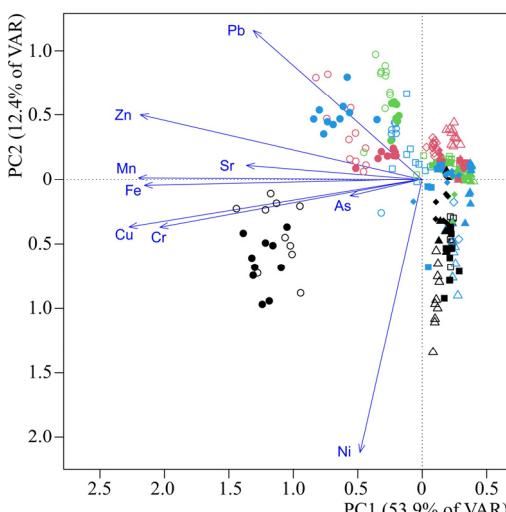


Рис. 2. Ординационная диаграмма PCA; цвет – названия парков: Останкинский парк – зелёный, Нескучный сад – красный, Филёвский парк – чёрный, Терлецкий парк – голубой; маркеры – ткани и органы: круг – шерсть, квадрат – кости, ромб – печень, треугольник – мышцы, полые маркеры – весна, заполненные – осень

Fig. 2. PCA ordination diagram. Color – the names of the parks: Ostankino Park – green, Neskuchny Garden – red, Filevsky Park – black, Terletsky Park – cyan. Markers – tissues and organs: circle – fur, square – bones, rhombus – liver, triangle – muscles, hollow markers – spring, filled – autumn

СЕЗОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

По второй компоненте повышенные значения демонстрируют образцы мышц, взятые весной в парках Фили и Терлецком. Pb занимает промежуточное положение между двумя главными компонентами. С ним связано повышенное накопление в образцах шерсти из Нескучного сада и Останкинского парка, взятых весной, и из Терлецкого парка, взятых осенью. Вектор As короткий из-за минимального накопления этого элемента в образцах.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе мы подтвердили, что в шерсти накопление ТМ выше, чем в других органах и тканях, и это оказалось справедливо практически для всех исследованных элементов независимо от сезона года. Исключение составил Sr, который также имел высокие показатели в костях в оба сезона, и Ni – с максимумом в мышцах.

Волосяной покров наземных млекопитающих играет значительную роль в накоплении и последующем ежегодном выведении ТМ вместе со старыми волосами во время линьки (Pastukhov et al., 2011). Интересно, что пигменты меланина, которые присутствуют в дериватах кожи, связывают ионы металлов, тем самым потенциально секвестрируя их в инертных частях тела, таких как шерсть и перья, и способствуя детоксикации организма. Таким образом, более темная окраска может давать селективное преимущество животным, живущим в загрязненных районах (Chatelain et al., 2014).

Ранее было показано, что Pb и Cd, накапливающиеся в шерсти, демонстрируют положительную линейную зависимость от концентрации этих металлов в почве (McLean et al., 2009). А исследование J. Beetsmaert с соавторами (2007) продемонстрировало, что концентрация ТМ в волосах целого ряда видов мелких млекопитающих в значительной степени зависела от концентраций металлов в окружающей среде и минимально – от веса и размера самих животных. Обнаруженные нами наиболее высокие концентрации большинства ТМ в шерсти полевых мышей, независимо от сезона года, могут также поддерживать предложение X. M. Маклин с соавторами (McLean et al., 2009) и Н. Я. Поддубной с соавторами (Poddubnaya et al., 2022) об использовании шерсти в качестве неинвазивного метода для общей оценки накопления ТМ у диких животных на охраняемых территориях и в городских парках. Однако, если планируется точный мониторинг, то особенности сезонного накопления ТМ также следует учитывать.

Как показали наши исследования, наиболее высокие концентрации большинства ТМ (особенно в шерсти) оказались у полевых мышей, обитающих в Филевском парке. Причем обнаруженная закономерность не зависела от сезона года. Следующим по загрязненности в весенний период оказался Нескучный сад, но если рассматривать показатели и весны и осени вместе, то по ряду ТМ, аккумулированных в шерсти полевых мышей, его «опередил» Терлецкий парк. Наиболее чистым из всех исследованных оказался Останкинский парк.

По большинству ТМ в разных органах и тканях полевых мышей (особенно по Pb) накопление было несколько выше весной, чем осенью. Полученные результаты совпали с результатами, обнаруженными для рыжих полевок, исследованных в пяти зонах мониторинга трех биогеографических регионов Швеции (Ecke et al.,

2020). Аналогичные данные также были получены и по содержанию ртути в шерсти и органах обыкновенной бурозубки (*Sorex araneus* Linnaeus, 1758) в г. Чебаповце (Ageeva et al., 2024). В последнем исследовании сравнивали животных, отловленных зимой и летом.

Считается, что сезонные различия в содержании ТМ могут быть связаны с доступностью источников пищи, изменениями в рационе и особенностями протекания физиологических процессов в организме животных в разные сезоны года. В частности, полевые мыши в осенне-зимний период включают в свой рацион больше животных кормов, которые содержат более высокие концентрации ТМ, например, ртути (Komov et al., 2017). Кроме того, снег как концентрированная форма осадков может обеспечивать повышенное содержание ТМ в организме животных в весенний период (Martinková et al., 2019).

Полученные в данной работе результаты в перспективе могут быть использованы для создания тест-систем, позволяющих проводить комплексную оценку экологического состояния городских экосистем с учетом сезонной и пространственной динамики циркуляции ТМ в окружающей среде и в организмах свободноживущих видов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

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>

Ahmad K., Ashfaq A., Khan Z. I., Bashir H., Sohail M., Mehmood N., Dogan Y. Metal accumulation in *Raphanus sativus* and *Brassica rapa*: An assessment of potential health risk for inhabitants in Punjab, Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, vol. 25, iss. 8, pp. 16676–16685. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1868-7>

Al Sayegh Petkovsek S., Kopošar N., Kryšufek B. Small mammals as biomonitor of metal pollution: A case study in Slovenia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, vol. 186, iss. 7, pp. 4261–4274. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3696-7>

Baslar S., Kula I., Dogan Y., Yildiz D., Ay G. A study of trace element contents in plants growing at Honaz Dagi-Denizli, Turkey. *Ekoloji*, 2009, vol. 18, iss. 72, pp. 1–7. <https://doi.org/10.5053/ekoloji.2009.721>

Bernaert J., Scheirs J., Leirs H., Blust R., Verhagen R. Non-destructive pollution exposure assessment by means of wood mice hair. *Environmental Pollution*, 2007, vol. 145, iss. 2, pp. 443–451. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.04.025>

Belenkova V. V., Karmanova T. N., Meshcherskiy S. I., Surov A. V., Katsman E. A., Feoktistova N. Yu. Bioaccumulation of heavy metals and arsenic in the tissues of striped field mouse (*Apodemus agrarius*) (Muridae, Rodentia) inhabits Moscow parks. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2025, no. 2, pp. 127–140 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2025-2-127-140>

Chatelain M., Gasparini J., Jacquin L., Frantz A. The adaptive function of melanin-based plumage coloration to trace metals. *Biology Letters*, 2014, vol. 10, iss. 3, article no. 20140164 <https://dx.doi.org/10.1098/rsbl.2014.0164>

Clemens S., Ma J. F. Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods. *Annual Review of Plant Biology*, 2016, vol. 67, pp. 489–512. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-043015-112301>

СЕЗОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

- Cui Y., Fan C., Zhou X., Yu P. Impact of urbanization on heavy metals in outdoor air and risk assessment: A case study in severe cold regions. *Sustainable Cities and Society*, 2024, vol. 114, article no. 105713. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105713>
- Ecke F., Benskin J. P., Berglund Å. M. M., de Wit C. A., Engström E., Plassmann M. M., Rodushkin I., Sörlin D., Hörfeldt B. Spatio-temporal variation of metals and organic contaminants in bank voles (*Myodes glareolus*). *Science of The Total Environment*, 2020, vol. 713, article no. 136353. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136353>
- Flickinger E. L., Nichols J. D. Small mammal populations at hazardous waste disposal sites near Houston, Texas, USA. *Environmental Pollution*, 1990, vol. 65, iss. 2, pp. 169–180. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(90\)90002-6](https://doi.org/10.1016/0269-7491(90)90002-6)
- Frossard J., Renaud O. *Permuco: Permutation Tests for Regression, (Repeated Measures) ANOVA/ANCOVA and Comparison of Signals. R Package Version 1.1.0.* 2019. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.permuco>
- Komarnicki G. J. K. Tissue, sex and age specific accumulation of heavy metals (Zn, Cu, Pb, Cd) by populations of the mole (*Talpa europaea* L.) in a central urban area. *Chemosphere*, 2000, vol. 41, iss. 10, pp. 1593–1602. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(00\)00018-7](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(00)00018-7)
- 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>
- 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>
- Martinkova B., Janiga M., Poganyova 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>
- McLean H. M., Koller C. E., Rodger J. C., MacFarlane G. R. Mammalian hair as an accumulative bioindicator of metal bioavailability in Australian terrestrial environments. *Science of The Total Environment*, 2009, vol. 407, iss. 11, pp. 3588–3596. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.01.038>
- Nasrabadi T., Nabi Bidhendi G. R., Karbassi A. R., Mehrdadi N. Evaluating the efficiency of sediment metal pollution indices in interpreting the pollution of Haraz River sediments, southern Caspian Sea basin. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, vol. 171, iss. 1–4, pp. 395–410. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1286-x>
- Oksanen J., Blanchet F. G., Friendly M., Kindt R., Legendre P., McGlinn D., Minchin P. R., O’hara R. B., Simpson G. L., Solymos P., Stevens M. H., Szoecs E., Wagner H. *Vegan: Community Ecology Package. R Package Version 2.5–6.* 2012. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=vegan> (accessed August 10, 2024).
- 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. Ser. Biology. Ecology*, 2011, vol. 4, no. 1, pp. 56–66 (in Russian).
- Poddubnaya N. Ya., Salkina G. P., Nikandrova V. A., Smirnova A. A. The role of feral felines in mercury transport in the ecosystem of the eastern Sikhote-Alin macroslope. In: *Sustainable Development of Specially Protected Natural Areas: Collection of articles of the IX All-Russian (National) scientific and practical conference*. Sochi, Donskoi izdatel’skii tsentr, 2022, vol. 9, pp. 334–340 (in Russian).
- R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing.* 2023. Available at: <https://www.R-project.org/> (accessed May 25, 2024).

Roumak V. S., Popov V. S., Shelepchikov A. A., Osipova O. V., Umnova N. V. Seasonal peculiarities of PCDD/Fs levels in bank voles inhabiting sites in the vicinity of the landfill with municipal wastes (Moscow, Russia). *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, vol. 29, iss. 35, pp. 52796–52805. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19602-3>

Talmage S. S., Walton B. T. Small mammals as monitors of environmental contaminants. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 1991, vol. 120, pp. 47–145. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3105-7_2

Tikhonova G. N., Tikhonov I. A., Kotenkova E. V., Munteanu A. I., Uspenskaya I. G., Konovalov Yu. N., Burlaku V. I., Kiku V. F., Georgitsa S. D., Karaman N. K., Nistreanu V. B., Mal'tsev A. N. Comparative analysis of small mammal communities in Chisinau and Yaroslavl, two European cities located in different biomes. *Russian Journal of Ecology*, 2012, vol. 43, iss. 3, pp. 236–242. <https://doi.org/10.1134/S1067413612030162>

Wren C. D. A review of metal accumulation and toxicity in wild mammals: I. Mercury. *Environmental Research*, 1986, vol. 40. iss. 1, pp. 210–244. [https://doi.org/10.1016/s0013-9351\(86\)80098-6](https://doi.org/10.1016/s0013-9351(86)80098-6)

Zarriantab M., Mirzaei R. Evaluation of some factors influencing on variability in bioaccumulation of heavy metals in rodents species: *Rombomys opimus* and *Rattus norvegicus* from central Iran. *Chemosphere*, 2017, vol. 169, pp. 194–203. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.056>

Zaynab M., Wang Z., Hussain A., Bahadar K., Sajid M., Sharif Y., Azam M., Sughra K., Raza M. A., Khan K. A., Li S. ATP-binding cassette transporters expression profiling revealed its role in the development and regulating stress response in *Solanum tuberosum*. *Molecular Biology Reports*, 2022, vol. 49, iss. 6, pp. 5251–5264. <https://doi.org/10.1007/s11033-021-06697-z>

Zhang S., Han G., Gao X. Urbanization impacts on potentially toxic metals: Distribution, sources, and risks in a river in a megacity, China. *Sustainable Cities and Society*, 2023, vol. 97, article no. 104784. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104784>

СЕЗОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Original Article

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2025-4-381-391>

Seasonal features of the accumulation of heavy metals and arsenic in the tissues of striped field mice (*Apodemus agrarius* Pallas, 1771) (Muridae, Rodentia) in Moscow parks

V. V. Belenkova¹, T. N. Karmanova¹, D. G. Seleznev²,
A. V. Surov¹, N. Yu. Feoktistova^{1✉}

¹ A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences
33 Leninsky Prospekt, Moscow 119071, Russia

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

Received: April 19, 2025 / revised: May 17, 2025 / accepted: May 20, 2025 / published: December 17, 2025

Abstract: In our previous study (Belenkova et al., 2025), we investigated the accumulation of heavy metals in the organs and tissues of striped field mice in the spring. The obtained data on the seasonal patterns of bioaccumulation were contradictory. We repeated our study using samples of striped field mice captured in the fall and compared the obtained data with the spring ones. It was shown that, overall, heavy metal (especially Pb) concentrations in the spring exceeded their fall levels. However, the patterns of heavy metal accumulation in the tissues of animals in specific parks remained the same, namely: the Filevsky Park remained the most polluted, while the Ostankinsky park remained the cleanest. These results could potentially be used to develop test systems for comprehensive assessments of the ecological state of urban ecosystems, taking into account the seasonal and spatial dynamics of heavy metal circulation in the environment and in free-living species.

Keywords: urban community, heavy metals, arsenic, seasonal differences, ecological state

Funding: This work was financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 24-24-20023).

Ethics approval and consent to participate: Animal protocols were approved by the Bioethics Commission of the A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences (protocol No. 22b dated March 4, 2024).

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

For citation: Belenkova V. V., Karmanova T. N., Seleznev D. G., Surov A. V., Feoktistova N. Yu. Seasonal features of the accumulation of heavy metals and arsenic in the tissues of striped field mice (*Apodemus agrarius* Pallas, 1771) (Muridae, Rodentia) in Moscow parks. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2025, no. 4, pp. 381–391 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2025-4-381-391>

✉ Corresponding author: Laboratory of Comparative Ethology and Biocommunication, A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Valeriya V. Belenkova: <https://orcid.org/0009-0008-5634-0115>, vbelenkova@yandex.ru; Tatyana N. Karmanova: <https://orcid.org/0000-0001-9287-5928>, karmanovs94@mail.ru; Dmitriy G. Seleznev: <https://orcid.org/0000-0003-2782-1696>, dmitriy@seleznev.name; Alexey V. Surov: <https://orcid.org/0000-0003-2030-8910>, surov@sevin.ru; Natalia Yu. Feoktistova: <https://orcid.org/0000-0003-4010-2880>, feoktistovanyu@gmail.com.