

Оригинальная статья

УДК 575.17:599.323.42

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2025-2-127-140>

БИОАККУМУЛЯЦИЯ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЫШЬЯКА В ТКАНЯХ ПОЛЕВЫХ МЫШЕЙ (*APODEMUS AGRARIUS*) (MURIDAE, RODENTIA), ОБИТАЮЩИХ В ПАРКАХ г. МОСКВЫ

В. В. Беленкова, Т. Н. Карманова, С. И. Мещерский,
А. В. Суров, Е. А. Кацман, Н. Ю. Феоктистова ✉

*Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН
Россия, 119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 33*

Поступила в редакцию 21.12.2024 г., после доработки 26.01.2025 г., принята 26.01.2025 г., опубликована 24.07.2025 г.

Аннотация. Исследовали биоаккумуляцию тяжёлых металлов в тканях (шерсть, мышцы, печень, кости) свободно живущих полевых мышей (*Apodemus agrarius*) в четырёх парках г. Москвы, расположенных на разном удалении от центра города и в зонах с разной степенью антропогенной нагрузки. Методом рентгенофлуоресцентного анализа количественно проанализировано содержание восьми тяжёлых металлов (Fe, Mn, Zn, Cr, Ni, Sr, Cu, Pb) и металлоида – As. Показано, что средние концентрации большинства тяжелых металлов в тканях мышей, обитающих в исследованных парках, достоверно различаются. Больше всего они накапливаются в шерсти, меньше в мышцах, печени и костях. Значимо большие концентрации металлов обнаружены в образцах из Филёвского парка, кроме Zn, Pb и As, максимальные концентрации которых были в образцах из Нескучного сада. Показатели Pb в шерсти полевых мышей не превышали референсных значений во всех парках, кроме Останкинского. Наименее загрязненным по показателям биоаккумуляции в шерсти, мышцах и печени оказался наиболее удаленный от центра города Терлецкий парк, несмотря на высокий балл «экологического неблагополучия». Таким образом, биоаккумуляция металлов происходит по-разному в тканях и органах свободно живущих полевых мышей, при этом расстояние от центра города и комплексный балл экологического благополучия не всегда отражаются на этом показателе. Для оценки экологической ситуации в разных районах города требуется разработка более сложной аналитической панели с учётом сезонной и пространственной динамики циркуляции загрязнителей, их кумулятивного влияния и разных механизмов метаболизма.

Ключевые слова: антропогенная нагрузка, тяжёлые металлы, референсные значения, экологическое благополучие

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

✉ Для корреспонденции. Лаборатория сравнительной этологии и биокommunikации 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>, karmanovs94@mail.ru; Мещерский Сергей Ильич: <https://orcid.org/0000-0001-5301-9846>, sergeymeshcherskiy@gmail.com; Суров Алексей Васильевич: <https://orcid.org/0000-0003-2030-8910>, surov@sevin.ru; Кацман Елена Александровна: <https://orcid.org/0000-0003-2899-2454>, elenkz05@gmail.com; Феоктистова Наталья Юрьевна: <https://orcid.org/0000-0003-4010-2880>; feoktistovanyu@gmail.com.

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 цитирования. Беленкова В. В., Карманова Т. Н., Мещерский С. И., Суров А. В., Кацман Е. А., Феоктистова Н. Ю. Биоаккумуляция тяжёлых металлов и мышьяка в тканях полевых мышей (*Apodemus agrarius*) (Muridae, Rodentia), обитающих в парках г. Москвы // Поволжский экологический журнал. 2025. № 2. С. 127 – 140. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2025-2-127-140>

ВВЕДЕНИЕ

Изменение биоты под влиянием урбанизации и влияние городской среды на здоровье человека являются одними из самых актуальных проблем экологии XXI в. (Sutherland et al., 2014). В первом десятилетии XXI в. население Земли преимущественно стало городским, и эта тенденция в будущем будет только усиливаться, а стремительное распространение городских экосистем на планете можно рассматривать как качественно новый этап развития жизни на Земле (Lahr et al., 2018). Человек создает и преобразует городскую среду, согласно своим потребностям, чтобы она становилась ещё более комфортной, для чего необходимо преодолевать негативные факторы, сопутствующие градостроительству. Ключевыми экологическими факторами риска, согласно «Докладу о состоянии окружающей среды в городе Москве в 2021 году» являются: загрязнение атмосферного воздуха мелкими взвешенными частицами, а также загрязнение природных объектов, в том числе почвы, воды, воздуха тяжёлыми металлами (Kulbachevsky, 2022) и микропластиком. Естественно, животные, населяющие города (синантропы и гемисинантропы), также испытывают влияние урбанизации и могут служить индикаторами загрязнения городской среды. Отработка методов оценки и проведение биомониторинга благополучия городской среды по состоянию животных, живущих рядом с человеком, представляется важным шагом к обеспечению устойчивого развития городов, в том числе Москвы, как одного из самых динамично развивающихся мегаполисов мира.

Одной из основных групп загрязнителей, представляющих угрозу здоровью человека и окружающей среде, являются тяжёлые металлы (ТМ) (Mzoughi, Chouba, 2012; Mhadhbi et al., 2012). Они не деградируют и длительное время сохраняются в почве (Ashraf et al., 2012; Okuku, Peter, 2012). Многие ТМ образуют стойкие органические соединения, которые могут попадать в организм на всех стадиях развития (Ogundiran et al., 2012; Serbaji et al., 2012), а хорошая растворимость их соединений способствует миграции в среде. Источниками ТМ являются промышленность, бытовые стоки, транспорт, свалки, дым и пыль, образующиеся при хозяйственной деятельности и т.д. (Terplay, 2013).

К ТМ обычно относят порядка 40 химических элементов, но особого контроля требуют те из них, превышение концентраций которых в тканях и органах оказывает наибольшее отрицательное влияние на живые организмы. Таковыми являются

железо (Fe), марганец (Mn), цинк (Zn), стронций (Sr), никель (Ni), хром (Cr), медь (Cu), ртуть (Hg), свинец (Pb). Количество исследований по биоаккумуляции ТМ и их токсическому воздействию на организм животных, в том числе мелких млекопитающих, постоянно растёт (Suhenko, 1995; Berckmoes et al., 2005; Scheirs et al., 2006; Beernaert et al., 2007; Schleich et al., 2010; Sizentsov et al., 2020). Это связано с тем, что, благодаря небольшим размерам и высокому уровню метаболизма, мелкие млекопитающие за более короткое время по сравнению с крупными накапливают большее количество ТМ (Levengood, Heske, 2008). Кроме того, млекопитающие филогенетически ближе к человеку, поэтому их удобнее использовать в качестве модельных объектов для оценки негативных влияний ТМ на организм человека.

Грызуны и насекомоядные – наиболее многочисленная группа мелких млекопитающих, населяющих города. Устойчивое развитие городов предполагает расширение парковых и лесопарковых зон, что способствует росту численности и разнообразия синурбических видов. Исследования содержания ТМ в организме свободно живущих грызунов проводились во многих городах мира: в Павлодаре (Shaimardanova, 2009), Аран-о-Бидголе (Zarrintab, 2017), Кракове (Damek-Poprawa, Sawicka-Kapusta, 2004), Ташкенте (Bykova, 2017). Однако для Москвы такие данные отсутствуют.

В своем исследовании мы обратились к одному из свободно живущих грызунов г. Москвы – полевой мыши (*Apodemus agrarius* Pallas, 1771). Ареал этого вида охватывает большую часть территории Европы и Азии. В естественных биотопах он населяет открытые ландшафты (луга, поля, разреженные леса с кустарниковыми зарослями), хорошо адаптируется к обитанию в городах и считается гемисинантропом (Tikhonova, Tikhonov, 2003). Полевую мышь регистрировали в Варшаве (Glivich, 1980; Gortat et al., 2013), в Брно (Pelicán et al., 1983), в Берлине (Klawitter, 1976), в Лейпциге (Klenke, 1986), в Санкт-Петербурге (Kliuchnik, Starostina, 1963), в Нижнем Новгороде (Petrov et al., 1980), в Томске (Andreevskikh, 2012), в Екатеринбурге (Chernousova, 1992) и некоторых других городах.

В Москве в конце XIX – начале XX в. полевая мышь была относительно редка. В 1950-е гг. на незастроенных территориях города среди грызунов доминировала домовая мышь (*Mus musculus* Linnaeus, 1758), второе место по численности занимали виды-двойники обыкновенной полёвки (*Microtus arvalis* Pallas, 1778 и *M. rossiaemeridionalis* Ognev, 1924) и лишь третье принадлежало полевой мыши. С 2000-х гг. полевая мышь стала абсолютным доминантом на незастроенных территориях мегаполиса (Karaseva et al., 1999; Ermolaeva et al., 2000; Tikhonova et al., 2012). Для вида характерны относительно небольшие участки обитания (около 2400 м²) и невысокая миграционная активность (Tikhonova et al., 2012), что перспективно для сравнения экологической обстановки в разных районах города.

Цель настоящего исследования – выявить различия в накоплении ТМ (Fe, Mn, Zn, Sr, Ni, Pb, Cr, Cu) и As в мышцах, печени, костях и шерсти полевой мыши в четырех парках г. Москвы, расположенных в разных зонах урбанизации, которая определяется удаленностью от центра города, плотностью промышленной застройки, а также степенью «экологического благополучия».

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Точки отловов полевой мыши в Москве выбирались по градиенту урбанизации. Зоны урбанизации отличаются друг от друга по долям техногенных и нетехногенных ландшафтообразующих компонентов и их соотношению. В разных городах выделяют разное количество зон урбанизации – от трех до шести. В Москве представлено шесть таких зон (Tikhonova et al., 2012), обозначенных на рис. 1 римскими цифрами.

Сбор материала проводили в апреле – июне 2024 г. в четырех парках г. Москвы (Нескучный сад, Филёвский парк, Останкинский и Терлецкий парки), расположенных в III, IV, V, VI зонах урбанизации соответственно. Согласно Экологической карте г. Москвы за 2024 г., эти парки расположены в районах с разными балльными оценками экологического благополучия, которые формируются на основе таких показателей, как наличие объектов промышленности, плотность населения, загруженность автотранспортом, площадь зелёных насаждений и др. (Ecological map..., 2025).

Нескучный сад (III зона урбанизации, 7 баллов) расположен в наиболее урбанизированной и близкой к центру части города, граничит с одной стороны с Ленинским проспектом, с другой – примыкает к набережной р. Москвы. Характеризуется высокой степенью рекреационной нагрузки. Вблизи Охотничьего домика отработано 100 ловушко-суток и отловлено 11 полевых мышей.

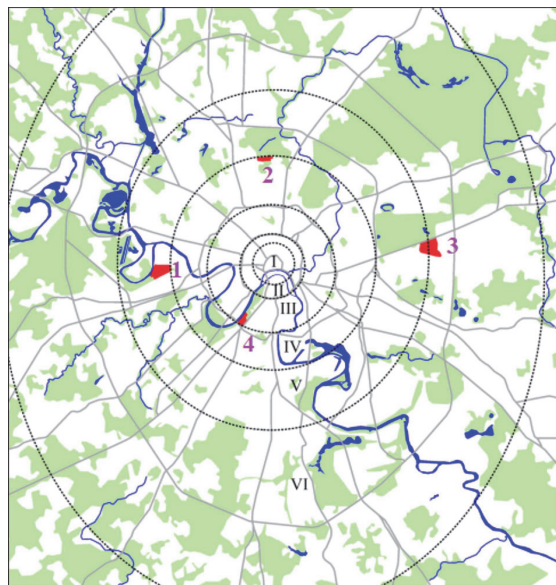


Рис. 1. Карта-схема Москвы с зонами урбанизации (по: Tikhonova et al., 2012) (пунктирные линии): 1 – Филёвский парк, 2 – Останкинский парк, 3 – Терлецкий парк, 4 – Нескучный сад

Fig. 1. A schematic map of Moscow with urbanization zones (according to Tikhonova et al., 2012) (dotted lines): 1 – Filevsky Park, 2 – Ostankino Park, 3 – Terletsky Park, 4 – Neskuchny Garden

Останкинский парк (IV зона урбанизации, 4 балла). Один из старейших московских парков, занимающий территорию дворцово-паркового ансамбля XVIII – XIX вв. С севера граничит с Ботаническим садом РАН, с северо-востока примыкает к ВДНХ. В 2014 г. эти три территории были объединены в самую большую зону отдыха в Москве площадью 540 га. Отловы животных производили в юго-восточной части вдоль границы с Городком космонавтов. Отработано 110 ловушко-суток, отловлено 11 полевых мышей.

Филёвский парк (V зона урбанизации, 4 балла) располо-

жен на западе Москвы вдоль поймы Москвы-реки. С севера, с запада, с юга и востока граничит с Новозаводской улицей, Солдатёновским парком, Большой Филёвской и улицей Баркляя соответственно. Рекреационная нагрузка также высокая. Отловы полевых мышей проводили в 50 м от Филёвской набережной вблизи родников в нижней части парка. Отработано 220 ловушко-суток, отловлено 10 полевых мышей.

Терлецкий парк (VI зона урбанизации, 8 баллов) отличается близким расположением к жилым районам старой малоэтажной и новой многоэтажной застройки. Отлов проводили на парковой территории вблизи мест рекреационного использования. Отработано 75 ловушко-суток, поймано 9 полевых мышей.

Для отлова грызунов использовали ловушки Геро с приманкой из черного хлеба, обжаренного на подсолнечном масле. Ловушки расставляли в сумерках, а собирали утром в 8:00 – 9:00 часов. После отлова проводили стандартные измерения: вес, длина тела, хвоста, плюсны, уха, определяли пол и примерный возраст. По показателям массы и размерам тела все животные отнесены к категории *adultus* и были перезимовавшими.

Пробоподготовка проходила в несколько этапов. Шерсть состригали со спины и боков тушки проспиртованными маникюрными ножницами, взвешивали на ювелирных весах до сотых долей грамма и упаковывали в индивидуально подписанный зип-лок пакет. Вес шерсти, полученной с одной особи, составлял не менее 0.1 г. При вскрытии извлекали и взвешивали печень, кости задних конечностей, а также мышцы, срезанные с задних конечностей. Образец ткани печени составлял в среднем 0.8 г, костей – 0.2 г, мышц – 0.8 г. Каждый образец упаковывали в подписанную пробирку Эппендорфа и хранили до проведения анализа при температуре -20°C. Всего было собрано 164 образца от 41 особи полевых мышей. 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). Прибор позволяет определять уровень измеряемых концентраций от долей ppb до мкг/л, анализировать химические элементы, проводить простой количественный анализ без использования внешних стандартных образцов в отсутствии матричных влияний и эффектов памяти.

Поскольку данные о референсных значениях или ПДК ТМ для мелких грызунов отсутствуют, то в случае шерсти и костей сравнение проводилось с ПДК, установленными для волос человека (Skalny, 2003).

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. Для *post-hoc* анализа использовался HSD-тест Тьюки для параметрической ковариационной модели.

Степень отличий накопления каждого химического элемента в разных органах, тканях и парках оценивали методом случайного леса (Random Forest – RF) с точностью и загрязнением Джини в качестве метрик. 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) и *randomForest* (Liaw, Wiener, 2002).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Корреляционный анализ выявил сильно скоррелированные между собой элементы: Cr, Mn, Fe, Cu и Zn (коэффициент корреляции $0.66 < r < 0.87$). С ними слабее положительно связаны Sr и Pb ($0.25 < r < 0.56$). Накопление As слабо связано с накоплением Cr, Mn, Cu, Sr и Pb ($0.17 < r < 0.42$), а накопление Ni положительно коррелирует только с накоплением Cu ($r = 0.28$).

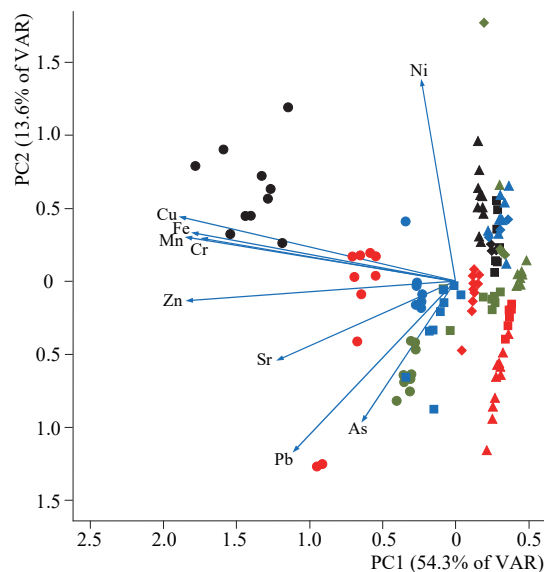


Рис. 2. Ординационная диаграмма PCA; цвет – названия парков: Останкинский парк – зелёный, Нескучный сад – красный, Филёвский парк – чёрный, Терлецкий парк – синий; маркеры – ткани и органы: круг – шерсть, квадрат – кости, ромб – печень, треугольник – мышцы

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

Ординационная диаграмма показывает распределение проб в пространстве двух главных компонент (рис. 2). Компонента PC1 (54.3% объясненной дисперсии) обратно ассоциирована с накоплением металлов Cu, Fe, Mn, Cr, Zn. Компонента PC2 (13.6% объясненной дисперсии) пропорциональна накоплению Ni и в меньшей степени обратно пропорциональна накоплению As и Pb. Из диаграммы видно, что максимальное накопление ТМ происходит в шерсти мышей, обитающих в Филёвском парке, чуть выше, чем в других парках – в костях мышей, обитающих в Терлецком парке. Накопление Ni было выше в мышцах животных из Филёвского и Терлецкого парков, ниже – из Нескучного сада, в котором выше накопление As и Pb.

Анализ зависимости накопления химических элементов по четырем исследованным паркам показал значимые различия по

всем элементам кроме Sr (perm p -value = 0.34) (табл. 1). Достоверно более высокие концентрации ТМ обнаружены в образцах из Филёвского парка, кроме Zn, Pb и As, максимальные концентрации которых были в образцах из Нескучного сада. Для Sr достоверные различия между парками отсутствовали. Анализ Random Forest показал, что наибольшие различия в накоплении ТМ по паркам в целом наблюдаются для Cr, Mn, Ni и Fe.

Таблица 1. Накопление химических элементов суммарно во всех исследованных тканях и органах полевых мышей в 4 парках г. Москвы, мкг/г

Table 1. Accumulation of chemical elements in total in all the studied tissues and organs of field striped mice in four Moscow parks, $\mu\text{g/g}$

Местоположение / Location	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Pb
par p -value	0.0002	0	0	0	0	0	0	0.3445	0.032
perm p -value	0.0003	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.3447	0.0326
Филёвский парк / Filevsky Park	0.80 ^A	3.38 ^A	155.54 ^A	0.35 ^A	11.43 ^A	93.76 ^{AB}	0.008 ^{AB}	10.92 ^A	0.48 ^A
Нескучный сад / Neskuchny Garden	0.41 ^{AB}	1.26 ^B	103.53 ^{AB}	0.005 ^C	6.60 ^B	108.12 ^A	0.0132 ^A	11.68 ^A	0.80 ^A
Останкинский парк / Ostankino Park	0.12 ^B	1.70 ^B	84.85 ^B	0.06 ^{BC}	4.96 ^B	66.19 ^C	0.0009 ^C	11.31 ^A	0.72 ^A
Терлецкий парк / Terletsky Park	0.39 ^{AB}	3.22 ^A	83.57 ^B	0.14 ^B	5.57 ^B	66.72 ^{BC}	0.005 ^{BC}	9.44 ^A	0.51 ^A

Примечание. par p -value – параметрический уровень значимости, perm p -value – перестановочный уровень значимости. В строках «парков» приведены размеры эффекта – средние значения накопления данного элемента в парке, нормированное на ковариату «ткани». Буквами обозначены результаты post-hoc HSD теста.

Note. par p -value is the parametric significance level, and perm p -value – the permuted significance level. The effect rates are shown in the park lines: the average values of accumulation of each element in the park, normalized to the covariate of the “tissue”. The letters indicate the results of the post-hoc HSD test.

Анализ особенностей накопления химических элементов тканями и органами полевой мыши показал значимые различия по всем ТМ (табл. 2). Максимальные концентрации большинства ТМ обнаружены в шерсти мышей, As – в шерсти и мышцах, Sr – в шерсти и костях, а Ni – только в мышцах. Анализ Random Forest показал в целом наибольшие различия накопления в тканях и органах для Sr, Zn и Fe.

Таблица 2. Накопление химических элементов по отдельным тканям и органам полевых мышей в 4 парках г. Москвы, мкг/г

Table 2. Accumulation of chemical elements by separate tissues and organs of striped field striped mice in four Moscow parks, $\mu\text{g/g}$

Ткань, орган / Tissue, organ	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Pb
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
par p -value	0	0	0	0.0001	0	0	0.0011	0	0
perm p -value	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0002	<0.0001	<0.0001	0.0014	<0.0001	<0.0001

Окончание табл. 2
Table 2. Continuation

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Кости / Bones	0.35 ^B	1.37 ^B	57.38 ^C	0.09 ^B	2.68 ^C	31.83 ^C	0.006 ^{AB}	16.94 ^A	0.28 ^B
Шерсть / Fur	1.15 ^A	5.56 ^A	224.8 ^A	0.12 ^B	16.3 ^A	236.98 ^A	0.009 ^A	18.83 ^A	1.44 ^A
Печень / Liver	0.01 ^B	1.38 ^B	119.87 ^B	0.06 ^B	4.92 ^B	53.22 ^B	0.002 ^B	1.87 ^B	0.2 ^B
Мышцы / Muscles	0.13 ^B	0.7 ^B	35.04 ^C	0.24 ^A	4.5B ^C	14.49 ^C	0.01 ^A	4.31 ^B	0.55 ^B

Примечание. par p -value – параметрический уровень значимости, perm p -value – перестановочный уровень значимости. В строках «ткани» приведены размеры эффекта – средние значения накопления элемента в ткани, нормированные на ковариату «парк». Буквами обозначены результаты post-hoc HSD теста.

Note. par p -value is the parametric significance level, and perm p -value – the permuted significance level. The effect rates are shown in the “tissue” lines: the average values of accumulation of each element in the tissue, normalized to the covariate of the “park”. The letters indicate the results of the post-hoc HSD test.

Поскольку биоаккумуляция большинства ТМ в шерсти была существенно выше, чем в других органах и тканях мышей (исключение составляет Sr, содержание которого в шерсти и в костях достоверно не различалось), в табл. 3 мы привели средние значения концентраций разных ТМ именно в шерсти полевых мышей и сопоставили эти данные с референсными значениями для волос человека (Skalny, 2003). Видно, что средние значения концентраций Mn и Fe превышали референсные значения во всех исследованных парках, Cu и Zn – в Нескучном саду и Филёвском парке, а Pb – только в Останкинском парке. As и Ni во всех парках были ниже референсных значений.

Таблица 3. Накопление химических элементов в шерсти полевых мышей в 4 парках г. Москвы, мкг/г

Table 3. Accumulation of chemical elements in the fur of striped field mouse in four Moscow parks, $\mu\text{g/g}$

Химический элемент / Chemical elements	par p -value	perm p -value	Филёвский парк / Filevsky Park	Нескучный сад / Neskuchny Garden	Останкинский парк / Ostankino Park	Терлецкий парк / Terletsky Park	Волосы человека / Human hair
Cr	0	<0.0001	3.07±0.14 ^A	1.24±0.06 ^B	0.06±0.06 ^C	0.11±0.01 ^C	0.510
Mn	0	<0.0001	9.74±0.51^A	4.12±0.16^{BC}	3.63±0.2^C	5.02±0.15^B	0.31–1.29
Fe	0	<0.0001	383.09±27.49^A	207.95±11.36^B	152.08±1.03^{BC}	146.83±1.72^C	11–25
Ni	0	<0.0001	0.37±0.04 ^A	0±0 ^B	0.05±0.04 ^B	0.07±0.05 ^B	0.14–0.53
Cu	0	<0.0001	27.32±0.83^A	17.43±0.22^B	10.23±0.26 ^C	9.21±1.23 ^C	9–14
Zn	0	<0.0001	297.94±12.03^A	268.16±9.35^A	190.88±2.39 ^B	178.96±22.51 ^B	145–206
As	0.042	0.027	0.02±0 ^A	0.02±0.01 ^A	0±0 ^A	0±0 ^A	0–0.98
Sr	0	<0.0001	18.04±2.25 ^B	0.02±0.01 ^A	17.12±0.77 ^B	9.3±1.17 ^C	0–30
Pb	0	<0.0001	1.18±0.12 ^B	1.09±0.35 ^B	2.47±0.11^A	0.97±0.13 ^B	0.38–1.67

Примечание. par p -value – параметрический уровень значимости, perm p -value – перестановочный уровень значимости. В строках парков приведены средние значения накопления элементов в шерсти + ошибка среднего. Буквами обозначены результаты post-hoc HSD теста. Жирным шрифтом выделены значения, превышающие ГОСТ для волос человека (по: Skalny, 2003).

Note. par p -value is the parametric significance level, and perm p -value – the permuted significance level. The rows of parks show the average values of the accumulation of elements in fur + the average error. The letters indicate the results of the post-hoc HSD test. The values exceeding GOST for human hair are emphasized (according to Skalny, 2003).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Живым организмам требуется разное, обычно небольшое, количество незаменимых тяжёлых металлов: Fe, Co, Cu, Mn, Mo и Zn. Но при избыточной концентрации все они опасны для здоровья (Zinina, 2001). Избыток Fe может отрицательно влиять на печень, сердце, поджелудочную железу. Избыток Zn токсичен для почек. Избыток Cu и её солей приводит к серьёзным нарушениям ЦНС, почек и печени (Gulieva et al., 2018). Избыток Mn отрицательно влияет на нервную систему, нарушает репродукцию и повреждает почки.

К токсичным химическим элементам относятся: Pb, Hg, Cd, Sr, Be, Al, Ni, As. Их накопление в организме животных и человека с течением времени может вызывать серьезные заболевания и преждевременную смерть (Gulieva et al., 2018).

Концентрация Pb (особенно в населённых пунктах) зависит от качества бензина. Хотя Pb может накапливаться в костях непрерывно, не повреждая их, он представляет собой постоянный источник загрязнения для других органов (Rabinowitz, 1991). В большинстве стран этилированное топливо постепенно заменяют на неэтилированные эквиваленты, что существенно снижает загрязнение среды этим элементом. В Москве эта проблема в настоящее время практически решена.

Ni и Cd также встречаются в выхлопных газах. Плотность дорожной сети в мире положительно коррелирует с уровнем загрязнения даже в безлюдных и относительно чистых областях, не говоря уже о мегаполисах. Ni является канцерогеном, и чрезмерное воздействие этого тяжёлого металла может вызвать снижение массы тела, повреждения сердца и печени (Homady et al., 2002).

Sr необходим для протекания нормальных процессов окостенения и образования прочной эмали зубов, однако его избыток может вызывать нарушения в минеральном обмене костной ткани – «стронциевый рахит», болезнь Кашина – Бека. Содержание Sr в волосах отражает длительность контакта организма с этим металлом и пропорционально его концентрации в костях (Ermakov, 2023).

Биоаккумуляция любого металла ограничивается скоростью его усвоения. Процесс накопления продолжается в течение всей жизни, однако у животных старшего возраста происходит снижение скорости метаболизма, поэтому накопление тяжёлых металлов находится в прямой зависимости от уровня загрязнения, и в исследованиях следует использовать только взрослых животных (Blagojević et al., 2012).

Как известно, биоаккумуляция химических элементов зависит от типа ткани и органа. В нашей работе, проведённой на полевой мыши, больше всего металлов накапливала шерсть, что справедливо практически для всех исследованных элементов (за исключением Sr, который не всегда имел самые высокие показатели именно в шерсти и Ni с максимумом в мышцах). Самый большой вклад в биоаккумуляцию металлов вносили Fe и Zn – наиболее широко распространенные в природе тяжёлые металлы. В целом наиболее загрязнённой оказалась шерсть полевых мышей, обитающих в Филёвском парке (достоверно более высокие показатели концентрации отмечены для Mn, Fe, Cu, Zn, Cr и Ni). Загрязнение шерсти Sr оказалось выше в Нескучном саду, а Pb – в Останкинском парке.

Что касается костной ткани, то мы видим противоположную тенденцию в биоаккумуляции ТМ по сравнению с шерстью, печенью и мышцами. Как показали предыдущие исследования, если анализ шерсти и мышц может стать хорошим методом для оценки загрязнения (Blagojević et al., 2012), то анализ костной ткани можно использовать только для общей оценки загрязнения, но не для определения каких-то конкретных уровней загрязнения, так как биоаккумуляция в костях – процесс более длительный.

Шерстной покров наземных млекопитающих играет значительную роль в накоплении и последующем ежегодном удалении загрязнителей вместе со старым волосом в процессе линьки (Pastukhov et al., 2011). Это позволяет поддержать предложение Н. Я. Поддубной с соавторами использовать только шерсть взрослых животных как неинвазивный метод для общей оценки уровня загрязнения ТМ у диких животных на различных территориях (Poddubnaya et al., 2022; Ageeva et al., 2024).

Оценка экологической ситуации, основанная на анализе содержания ТМ в разных органах и тканях животных, обитающих в городской среде, позволит своевременно выявлять негативные тенденции, связанные с загрязнением, и принимать обоснованные управленческие решения. В перспективе возможно создание аналитической панели, позволяющей комплексно оценивать экологическую ситуацию в урбоценозах с учетом сезонной и пространственной динамики циркуляции ТМ в окружающей среде и в организме свободноживущих видов. Это должно способствовать повышению устойчивости городской экосистемы, сохранению биоразнообразия, улучшению условий жизни населения и оптимизации взаимодействия между природными и антропогенными компонентами городской среды.

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>
- Andreevskikh A. *Ecological, Physiological and Ethological Adaptations of the Field Mouse (Apodemus agrarius Pall.) in an Urban Environment*: Thesis Diss. Cand. Sci. (Biol.). Tomsk, 2012. 23 p. (in Russian).
- Ashraf M. A., Ashraf M., Shahbaz M. Growth stage-based modulation in antioxidant defense system and proline accumulation in two hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars differing in salinity tolerance. *Flora – Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2012, vol. 207, iss. 5, pp. 388–397. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2012.03.004>
- Beernaert 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>
- Berckmoes V., Scheirs J., Jordaens K., Blust R., Backeljau T., Verhagen R. Effects of environmental pollution on microsatellite DNA diversity in wood mouse (*Apodemus sylvaticus*) populations. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 2005, vol. 24, iss. 11, pp. 2898–2907. <https://doi.org/10.1897/04-483R.1>
- Blagojevic J., Jovanovic V., Stamenkovic G., Jojic V., Adnadevic T., Vujosevic M. Age differences in bioaccumulation of heavy metals in populations of the black-striped field mouse,

Apodemus agrarius (Rodentia, Mammalia). *International Journal of Environmental Research*, 2012, vol. 6, iss. 4, pp. 1045–1052.

Bykova E. *The Impact of Urbanization on the Fauna and Ecology of Mammals in Uzbekistan (on the example of Tashkent)*: Thesis Diss. Cand. Sci. (Biol.). Tyumen, 2017. 24 p. (in Russian).

Chernousova N. Non-philanthropic small mammals of the green areas of Sverdlovsk. In: Nekrasova L. S., ed. *Animals in an Anthropogenic Landscape*. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 1992, pp. 28–38 (in Russian).

Damek-Poprawa M., Sawicka-Kapusta K. Histopathological changes in the liver, kidneys, and testes of bank voles environmentally exposed to heavy metal emissions from the steelworks and zinc smelter in Poland. *Environmental Research*, 2004, vol. 96, iss. 1, pp. 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2004.02.003>

Ecological map of Moscow–2025. *Novostroi-M.ru*. Moscow, 2025. Available at: <http://www.novostroy-m.ru/ekologiya-v-moskve#rating> (accessed January 9, 2025).

Ermakov V. V. *Strontium in the Biosphere*. Novosibirsk, Akademizdat, 2023. 168 p. (in Russian).

Ermolaeva E., Korotkov Yu., Telicyna A., Karaseva E., Stepanova N. Features of the dynamics of the field mouse population in the undeveloped territories of Moscow and the nearest suburbs (in the second half of the 20th century). *RET-info*, 2000, vol. 1, pp. 5–10 (in Russian).

Frossard J., Renaud O. *Permuc: 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>

Glivich I. Studies of the process of synurbanization of animals using the example of urban populations. *Studia Geographica* (Brno), 1980, vol. 71, pp. 95–104.

Gortat T., Rutkowski R., Gryczynska-Siemiatkowska A., Kozakiewicz A., Kozakiewicz M. Genetic structure in urban and rural populations of *Apodemus agrarius* in Poland. *Mammalian Biology*, 2013, vol. 78, iss. 3, pp. 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.mambio.2012.07.155>

Gulieva A. A., Geidarov A. A., Makhmudov M. K., Kasumova N. M. Sorption recovery of cobalt, copper, zinc, and manganese ions from technical solutions by modified natural zeolites. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2018, vol. 2018, iss. 7, pp. 605–613. <https://doi.org/10.1134/S0036029518070054>

Homady M., Hussein H., Jiries A., Mahasneh A., Al-Nasir F., Khleifat K. Survey of some heavy metals in sediments from vehicular service stations in Jordan and their effects on social aggression in prepubertal male mice. *Environmental Research*, 2002, vol. 89, iss. 1, pp. 43–49. <https://doi.org/10.1006/enrs.2002.4353>

Karaseva Ye. V., Telitsyna A. YU., Samoylov B. L. *Mammals of Moscow in the Past and the Present*. Moscow, Nauka, 1999. 245 p. (in Russian).

Klawitter J. Zur Verbreitung der Fledermäuse in Berlin (West) von 1945–1976. *Myotis*, 1976, no. 14, S. 3–14.

Klenke R. Ecofaunistic investigations of the small mammal populations in different habitat isles in Leipzig. *Wissenschaftliche Zeitschrift Karl-Marx-Universität Leipzig*, 1986, vol. 35, iss. 6, pp. 607–618.

Kliuchnik N., Starostina A. About non-plant species of rodents of Leningrad. *Zoologicheskii zhurnal*, 1963, vol. 42, no. 10, pp. 1554–1560 (in Russian).

Kulbachevsky A. O., ed. *Report “On the State of the Environment in the City of Moscow in 2021”*. Moscow, Moscow Municipal Economy Complex Publ., 2022. Available at: https://www.mos.ru/upload/content/files/d6fb4810f42661667ce2d1b353dbc5ea/2022_all.pdf (accessed March 10, 2024).

Lahr E. C., Dunn R. R., Frank S. D. Getting ahead of the curve: Cities as surrogates for global change. *Proceedings of the Royal Society B*, 2018, vol. 285, iss. 1882, article no. 20180643. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.0643>

Levensgood 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>

Liaw A., Wiener M. Classification and regression by RandomForest. *R News*, 2002, vol. 2, pp. 18–22.

Mhadhbi L., Fumega J., Boumaiza M., Beiras R. Acute toxicity of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) for turbot (*Psetta maxima*) early life stages (ELS). *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, vol. 19, iss. 3, pp. 708–717. <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0602-5>

Mzoughi N., Chouba L. Heavy metals and PAH assessment based on mussel caging in the north coast of Tunisia (Mediterranean Sea). *International Journal of Environmental Research*, 2012, vol. 6, no. 1, pp. 109–118. <https://doi.org/10.22059/ijer.2011.477>

Ogundiran M. B., Ogundele D. T., Afolayan P. G., Osibanjo O. Heavy metals levels in forage grasses, leachate and lactating cows reared around lead slag dumpsites in Nigeria. *International Journal of Environmental Research*, 2012, vol. 6, no. 3, pp. 695–702. <https://doi.org/10.22059/ijer.2012.540>

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).

Okuku E. O., Peter H. K. Choose of heavy metals pollution biomonitors: A critic of the method that uses sediments total metals concentration as the benchmark. *International Journal of Environmental Research*, 2012, vol. 6, no. 1, pp. 313 – 322. <https://doi.org/10.22059/ijer.2011.497>

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).

Pelican J., Zeida J., Homolka M. Mammals in the urban agglomeration of Brno. *Acta Scientarium Naturalium Brno*, 1983, vol. 17, no. 9, pp. 1–49.

Petrov V., Leont'eva M., Solov'ev Iu., Prokop'eva N. To study the fauna and ecology of rodents of a large city. In: *Rodents: Materials of the 5th All-Union Meeting*. Moscow, Nauka, 1980, pp. 434–435 (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).

Rabinowitz M. B. Toxicokinetics of bone lead. *Environmental Health Perspectives*, 1991, vol. 91, pp. 33–37. <https://doi.org/10.1289/ehp.91913>

Scheirs J., Vandevyvere I., Wollaert K., Blust R., De Bruyn L. Plant-mediated effects of heavy metal pollution on host choice of a grass miner. *Environmental Pollution*, 2006, vol. 143, iss. 1, pp. 138–145. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.11.001>

Schleich F. N., Seidel L., Sele J., Manise M., Quaedvlieg V., Michils A., Louis R. Exhaled nitric oxide thresholds associated with a sputum eosinophil count $\geq 3\%$ in a cohort of unselected patients with asthma. *Thorax*, 2010, vol. 65, iss. 12, pp. 1039–1044. <https://doi.org/10.1136/thx.2009.124925>

Serbaji M. M., Azri C., Medhioub K. Anthropogenic contributions to heavy metal distributions in the surface and sub-surface sediments of the northern coast of Sfax, Tunisia. *International*

Journal of Environmental Research, 2012, vol. 6, no. 3, pp. 613–626. <https://doi.org/10.22059/ijer.2012.531>

Shaimardanova B. Kh. Lead in the tissues of mouse-like rodents from an industrial city in northeastern Kazakhstan. *Engineering Technologies and Systems*, 2009, vol. 1, pp. 153–154 (in Russian).

Sizentsov Ya. A., Salnicova E. V., Sizentsov A. N., Pelikh V. I. Determination of bioaccumulation of heavy metals in the body of laboratory animals by means of determining their concentration in biological samples. In: *Integration and Differentiation of Science and Practice in the Context of Priority Paradigms of Civilization Development: Collection of scientific articles on the results of the National Scientific and Practical Conference*. St. Petersburg, St. Petersburg State Economic University Publ., 2020, pp. 14–16 (in Russian).

Skalny A. V. Reference values of the concentration of chemical elements in hair obtained by the ICP-NPP method (ANO Center for Biotic Medicine). *Microelements in Medicine*, 2003, vol. 4, no. 1, pp. 55–56 (in Russian).

Suhenko S. A. *Mercury in Reservoirs: A New Feature of Man-Made Environmental Pollution*. Novosibirsk, State Public Scientific and Technical Library of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 1995. 59 p. (in Russian).

Sutherland C., Robbins G., Scott D., Sim V. Durban City Report. *City Report (Chance2Sustain)*, 2014, pp. 1–89.

Teplay G. N. Heavy metals as a factor of environmental pollution (review). *Astrakhan Bulletin of Ecological Education*, 2013, no. 1, pp. 182–192 (in Russian).

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., Nisteanu 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>

Tikhonova G. N., Tikhonov I. A. Habitat distribution and reproductive peculiarities of three rodent species in northeastern Moscow region. *Zoologicheskiy zhurnal*, 2003, vol. 82, no. 11, pp. 1357–1367 (in Russian).

Zarrintab M., Milto K. D., Eskandarzadeh N., Zangi B., Jahan M., Kami H. G., Rajabizadeh M. Taxonomy and distribution of sand boas of the genus *Eryx* Daudin, 1803 (Serpentes: Erycidae) in Iran. *Zoology in the Middle East*, 2017, vol. 63, iss. 2, pp. 117–129. <https://doi.org/10.1080/09397140.2017.1299330>

Zinina O. T. The influence of certain heavy metals and trace elements on biochemical processes in the human body. In: *Selected Issues of Forensic Medical Examination*. Khabarovsk, Far Eastern State Medical University Publ., 2001, iss. 4, pp. 99–105 (in Russian).

**Bioaccumulation of heavy metals and arsenic in the tissues
of striped field mouse (*Apodemus agrarius*) (Muridae, Rodentia)
inhabits Moscow parks**

**V. V. Belenkova, T. N. Karmanova, S. I. Meshcherskiy,
A. V. Surov, E. A. Katsman, N. Yu. Feoktistova** ✉

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

Received: December 21, 2024 / revised: January 26, 2025 / accepted: January 26, 2025 / published: July 24, 2025

Abstract. Heavy metal bioaccumulation in the tissues (fur, muscles, liver, and bones) of free-living striped field mouse (*Apodemus agrarius*) was studied in four Moscow parks located at different distances from the city center and in areas with varying degrees of anthropogenic impact. The content of eight heavy metals (Fe, Mn, Zn, Cr, Ni, Sr, Cu, and Pb) and metalloids As was quantitatively analyzed by X-ray fluorescence analysis. The accumulation of heavy metals in the tissues and organs of mice living in the studied parks has been shown to occur in different ways. Most of them accumulate in fur, less in muscles, liver and bones (with the exception of Sr, which did not always have the highest concentration in fur, and Ni, with the maximum in muscles). Significantly higher concentrations of the metals were found in samples from the Filevsky Park (higher concentrations were noted for Mn, Fe, Cu, Zn, Cr, and Ni). Sr and Pb accumulation in fur was higher in the Neskuchny Garden and the Ostankino Park, respectively. The Terletsky Park is the most distant from the city center; it is the least polluted one in terms of bioaccumulation in fur, muscles and liver, despite the high score of environmental disadvantage. Thus, metal bioaccumulation occurs in different ways in the tissues and organs of free-living striped field mice, while the distance from the city center and the comprehensive environmental well-being score do not always affect this indicator. To assess the environmental situation in different parts of the city, it is necessary to develop a more complex analytical panel, taking into account the seasonal and spatial dynamics of the circulation of pollutants, their cumulative effects and different metabolic mechanisms.

Keywords: anthropogenic impact, heavy metals, reference values, environmental well-being

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).

Conflict of interest: The authors have declared that no competing interests exist.

For citation: 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>

✉ *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; Sergey I. Meshcherskiy: <https://orcid.org/0000-0001-5301-9846>, sergymeshcherskiy@gmail.com; Alexey V. Surov: <https://orcid.org/0000-0003-2030-8910>, surov@sevin.ru; Elena A. Katsman: <https://orcid.org/0000-0003-2899-2454>, elenkz05@gmail.com; Natalia Yu. Feoktistova: <https://orcid.org/0000-0003-4010-2880>; feoktistovanyu@gmail.com.