

Токсичные и биогенные элементы в органах и тканях белой куропатки (*Lagopus lagopus* L., 1758) на севере Красноярского края (обзор)

© 2024. П. В. Кочкарев¹, к. б. н., директор заповедника,
 М. А. Перевозчикова², к. в. н., с. н. с.,
 А. А. Сергеев², к. б. н., зам. директора по науке,
 В. В. Ширяев², д. б. н., в. н. с., В. Н. Пиминов², к. б. н., в. н. с.,
¹ФГБУ Государственный природный биосферный заповедник
 «Центральносибирский»,
 663246, Россия, Красноярский край, пос. Бор, ул. Грибная, д. 1а,
²Всероссийский научно-исследовательский институт
 охотничьего хозяйства и звероводства им. проф. Б.М. Житкова,
 610000, Россия, г. Киров, ул. Преображенская, д. 79,
 e-mail: shiryayev49@mail.ru

Изучение содержания биогенных и токсичных микроэлементов в организме диких животных актуально для организации регионального экомониторинга, оценки состояния популяций и обеспечения безопасности мясо-дичной продукции. Исследования осуществлялись с целью определения содержания биогенных и токсических элементов в органах и тканях белой куропатки на севере Красноярского края, где предполагается различный уровень техногенного загрязнения. Методом атомно-абсорбционной спектрометрии определена концентрация железа, меди, никеля, свинца и кадмия в грудных мышцах и печени белых куропаток (*Lagopus lagopus* L.) (n=162), добытых в течение пяти охотничьих сезонов в период с 2005 по 2019 гг. Уровни свинца, кадмия и железа в тканях куропаток были достоверно выше на загрязнённых территориях, а содержание меди не различалось. Концентрации элементов в тканях печени и скелетной мускулатуре на импактных территориях высоко коррелировали друг с другом, что может быть связано с общими источниками эмиссии загрязняющих веществ. Половые различия микроэлементного состава могут определяться пространственной дифференциацией полов во время миграций, сезонными особенностями питания и спецификой обменных процессов птиц в репродуктивный период. В пробах печени и мышечной ткани с импактных территорий концентрация кадмия и свинца превышала существующие гигиенические параметры для пищевых продуктов, что может представлять угрозу для потребителей. Высокие уровни свинца и кадмия, вероятно, отражают повышенное содержание металлов в кормовых объектах, прежде всего побегах и почках ив, являющихся важнейшим зимним кормом белой куропатки.

Ключевые слова: белая куропатка, микроэлементы, тяжёлые металлы, загрязнение, свинец, кадмий, медь, экотоксикология, охота, мясо дичи.

Toxic and biogenic elements in the organs and tissues of the willow ptarmigan (*Lagopus lagopus* L., 1758) in the north of the Krasnoyarsk Region (review)

© 2024. P. V. Kochkarev¹ ORCID: 0000-0001-5995-3963,
 M. A. Perevozchikova² ORCID: 0000-0003-3638-3712, A. A. Sergeev² ORCID: 0000-0002-9461-5131,
 V. V. Shiryayev² ORCID: 0000-0002-4549-5727, V. N. Piminov² ORCID: 0009-0008-5092-1314,
¹State Natural Biosphere Reserve “Central Siberian”,
 1a, Gribnaya St., Bor village, Turukhansky district, Russia, 663246,
²Russian Game Management and Fur Farming Research Institute
 named by Professor B.M. Zhitkov,
 79, Preobrazhenskaya St., Kirov, Russia, 610000,
 e-mail: shiryayev49@mail.ru

Studying the concentration of biogenic and toxic microelements in the body tissues of wild animals is relevant for organizing regional environmental monitoring, assessing the state of populations and ensuring the safety of meat and wild products. The studies were carried out to determine the content of biogenic and toxic elements in the organs and tissues of the willow ptarmigan in the north of the Krasnoyarsk Region, Russia, where different levels of technogenic pollution

are expected. The iron, copper, nickel, lead, and cadmium content in the pectoral muscles and liver of willow ptarmigan (*Lagopus lagopus* L.) (n=162), bagged during five hunting seasons in 2005–2019, were determined using atomic absorption spectrometry. The levels of lead, cadmium and iron in the tissues were significantly higher in contaminated areas, while the copper levels did not differ. Element concentrations in liver and skeletal muscle in impact areas were highly correlated with each other. This may be related to common sources of pollutant emissions. Sex differences in micronutrient content can be determined by spatial differentiation of the sexes during migration, seasonal feeding patterns, and the specific birds' metabolism in reproductive period. Cadmium and lead content in liver and muscle tissue samples from impact areas exceeded current food hygiene standards, which may pose a threat to consumers. Probably, high levels of lead and cadmium reflect the increased content of metals in food items primarily willow sprouts and buds, which are the most important winter food for ptarmigan.

Keywords: willow ptarmigan, trace elements, heavy metals, pollution, lead, cadmium, copper, ecotoxicology, hunting, game meat.

Важнейшим условием устойчивого функционирования природных популяций любого вида считается их способность существовать в неблагоприятных условиях, включая интенсивное антропогенное воздействие [1]. Развитие промышленности и сельского хозяйства привели к загрязнению окружающей среды и попаданию токсичных элементов в компоненты биоты [2]. Тяжёлые металлы, присутствующие в окружающей среде, имеют тенденцию накапливаться в организме животных, мигрируя по пищевым цепям. Биоаккумуляция токсичных металлов вызывает ряд патологических состояний, тем самым создавая серьёзную опасность для здоровья людей и животных. С точки зрения потенциальной опасности в число загрязнителей, вызывающих наибольшую озабоченность, входят кадмий и свинец, в то время как железо и медь, являясь биогенными элементами, могут проявлять негативные эффекты как при дефиците, так и в избыточных концентрациях.

Нарастающее антропогенное воздействие играет значительную роль в судьбе популяций многих видов птиц, определяя снижение численности, продуктивности, а иногда и сокращение биоразнообразия [3–5]. Особенно это актуально для арктических широт, где экосистемы менее устойчивы и более уязвимы [6, 7], а освоение минерально-сырьевой базы происходит нарастающими темпами [8]. Химическое воздействие, хоть и не является ключевым для большинства территорий, может оказывать значимое влияние на благополучие отдельных популяций и сообществ.

Дикие животные, имеющие возможность свободно перемещаться в пространстве, нередко встречаются на территориях, подверженных химическому загрязнению [9]. В этой связи они представляют особую ценность в качестве экотоксикологических биоиндикаторов [10]. Однако данные по микроэлементам диких животных и химической загрязнённости охотничьей продукции

весьма ограничены, хотя они очень важны для мониторинга качества окружающей среды, оценки влияния токсикантов на популяции и обеспечения здоровья населения. Широкое распространение, способность создавать высокие плотности и мигрировать на значительные расстояния делают белую куропатку ценным объектом экомониторинговых исследований. Эти птицы имеют большое значение для аборигенного населения Крайнего Севера, повсеместно являясь массовым объектом промысла и питания. В середине двадцатого века добыча белой и тундряной (*Lagopus muta*) куропаток (при большей численности белой куропатки) составляла от 230 до 930 тысяч особей ежегодно [11]. В условиях интенсификации освоения полярных регионов Российской Федерации значимость белой куропатки как пищевого объекта будет сохраняться. В этой связи любые новые данные о химическом составе органов и тканей белой куропатки представляют несомненный научный и практический интерес. Исследования осуществлялись с целью определения содержания биогенных и токсических элементов в органах и тканях белой куропатки на севере Красноярского края, где предполагается различный уровень техногенного загрязнения.

Объекты и методы исследований

В качестве материала для исследования использованы скелетная мускулатура и печень взрослых белых куропаток. Материал для исследований собран на территории Красноярского края РФ: на загрязнённых в результате деятельности горнодобывающих и металлургических предприятий участках в районе верхнего течения (71°06'9027 с. ш., 85°43'1391 в. д.) и устья р. Агапа (71°44'1871 с. ш., 89°17'6881 в. д.), в районе бывшего посёлка (б. п.) Ананьино (69°75'9365 с. ш., 85°67'96327 в. д.), и на фоновых территориях в окрестностях п. Новая, расположенного на одноимённой р. Новая

(71°319090 с. ш., 99°312443 в. д.). Отбор биоматериала производился в охотничий сезон в период с сентября по ноябрь. Экспериментальные данные получены в период с 2005 по 2019 гг., однако остаются актуальными, поскольку, по информации Министерства экологии и рационального природопользования Красноярского края, за этот период характер и уровень техногенной нагрузки существенно не изменялся. Кроме того, собранные сведения могут быть использованы для сравнительных выводов при проведении экологического мониторинга территорий исследований в ближайшей и отдалённой перспективе.

Добычу белых куропаток осуществляли петлями и ружейным способом местные охотники из числа коренных и малочисленных народов Севера (КМНС). Добытые птицы ($n=162$) метились заранее изготовленной биркой, надетой на шею. Тушки замораживали в леднике при температуре $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ и помещали в отдельные новые пакеты из пищевого пластика. Раз в десять дней их перевозили авиатранспортом в г. Дудинка, где в сертифицированной ветеринарной лаборатории одним из авторов производилась дальнейшая обработка материала. Тушки размораживали, вскрывали, отбирали пробы грудной мускулатуры и печени для микроэлементного анализа. Образцы внутренних органов, отобранные для спектрофотометрии, помещали в химически нейтральную упаковку (полиэтилен для пищевых продуктов) и хранили при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. В лабораторных условиях образцы высушивали при $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ до постоянной массы. Для измельчения проб использовали электрические лабораторные мельницы. Для работы подбирались химически нейтральные инструменты (легированная сталь, обсидиановый нож), упаковочные материалы (полиэтилен для пищевых продуктов) и лабораторная посуда (пластик и химически нейтральное стекло). Содержание пяти микроэлементов (Fe, Cd, Pb, Cu, Ni) в мышцах груди и печени определяли в сертифицированной химической лаборатории Референтного центра УФС Россельхознадзора по Красноярскому краю (г. Красноярск) на атомно-абсорбционных спектрофотометрах Sollar (TJA Solution, США) и Varian (Agilent Technologies, США). Во всех случаях проводилось три параллельных опыта. Содержание макро- и микроэлементов определено в воздушно-сухом сырье в мг/кг (мг/кг с. в.), а также в пересчёте на натуральную влажность (мг/кг н. в.), что связано с необходимостью сопоставления данных исследований и су-

ществующих ПДК. Аналитические работы, а также пересчёт значений концентрации на натуральное вещество (н. в.) производились по общепринятым методикам [12]. Точность работы аналитической аппаратуры контролировалась специалистами Государственного комитета РФ по стандартизации, метрологии и сертификации с помощью специализированных эталонов (методические указания по поверке 5Г1.550.082 Д1, условия и периодичность согласно ГОСТ 8.002-71).

Статистическая обработка полученных данных проводилась на персональном компьютере IBM с использованием программного обеспечения MS Excel (Office 2019) и Statgraphics (19-X64) общепринятыми методами [13]. Для описания выборок определяли среднее значение (M), стандартное отклонение (SD), медиану (Med), 25% и 75% процентиля. Поскольку были основания предполагать, что в ряде случаев распределение полученных нами значений отличалось от нормального, наряду с параметрическими, активно использовались и непараметрические методы анализа [14, 15]. Для проверки достоверности различий между двумя выборками использовались критерии Стьюдента, Фишера, метод множественного сравнения Ньюмена-Кейсла, а также непараметрические критерии Манна-Уитни и Данна. Для сравнения нескольких независимых выборок по одному признаку применялся однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA-test) и непараметрический дисперсионный анализ с использованием критерия Краскала-Уоллиса. Для выяснения взаимосвязи между несколькими выборками рассчитывались коэффициенты ранговой корреляции Спирмена, а также использовался регрессионный анализ. Нулевую гипотезу отклоняли на уровне значимости менее 0,05.

Результаты и обсуждение

Показатели концентрации свинца, кадмия, меди, никеля и железа в печени и мышечной ткани белых куропаток на фоновых и загрязнённых территориях на севере Красноярского края представлены в таблице.

На импактных территориях концентрация свинца, кадмия и железа оказалась достоверно выше, чем на фоновом участке. Содержание загрязняющих веществ в мышцах самок на загрязнённых территориях (б. п. Ананьино, р. Верхняя Агапа, устье р. Агапа) было достоверно выше по сравнению с фоновыми (р. Новая): кадмия в среднем в 26–38 раз,

Таблица / Table

Микроэлементный состав (мг/кг н. в.) скелетной мускулатуры и печени белых куропаток фоновых и загрязнённых территорий Красноярского края / Trace element composition (mg/kg ww) of muscles and liver of willow ptarmigan on background and polluted territories of the

Пол Sex	n	Показатели Indicators	Cd	Cu	Ni	Pb	Fe
Участок у б. п. Ананыно, печень куропаток / Area near Ananino village, liver of willow ptarmigan							
Самцы Males	10	♂ min-max M±SD Med	0,52–0,74 0,61±0,07 0,62	9,2–12,20 10,38±0,87 10,50	0,28–0,48 0,38±0,069 0,40	0,31–1,74 0,58±0,55 0,34 ^A	248,00–521,00 401,00±85,77 405,00 ^A
Самки Females	10	♀ min-max M±SD Med	0,42–0,95 0,66±0,15 0,64	8,50–13,50 10,95±1,69 11,25	0,33–0,43 0,37±0,03 0,37	0,18–0,37 0,28±0,06 0,26 ^A	175,00–612,00 297,00±149,67 243,50 ^A
Участок у б. п. Ананыно, мышцы куропаток / Area near Ananino village, muscles of willow ptarmigan							
Самцы Males	10	♂ min-max M±SD Med	0,45–0,95 0,68±0,17 0,67 ^C	4,40–11,20 7,48±2,28 7,85 ^{A, E}	0,25–0,64 0,41±0,12 0,41 ^F	0,42–1,15 0,69±0,21 0,64 ^{A, C, E}	65,00–180,00 134,00±34,33 134,00 ^C
Самки Females	10	♀ min-max M±SD Med	0,15–0,96 0,53±0,27 0,57 ^B	5,60–18,50 10,92±3,74 10,90 ^{A, E}	0,21–0,62 0,35±0,12 0,32 ^F	0,65–1,10 0,80±0,12 0,78 ^{A, B, E}	52,00–165,00 92,80±39,97 83,00
Участок поймы на р. Верхняя Агапа, мышцы куропаток Floodplain area Verkhnyaya Agapa River, muscles of willow ptarmigan							
Самцы Males	30	♂ min-max M±SD Med	0,08–0,84 0,47±0,23 0,56 ^{C, D}	4,10–6,50 4,94±0,79 4,80 ^{A, E}	0,12–0,32 0,17±0,03 0,18 ^F	0,16–0,35 0,26±0,06 0,27 ^{C, E, D}	85,00–185,00 127,53±22,21 126,50 ^{C, D}
Самки Females	27	♀ min-max M±SD Med	0,07–0,94 0,50±0,29 0,52 ^B	4,20–8,60 6,27±1,43 6,30 ^{A, E}	0,13–0,25 0,17±0,03 0,16 ^F	0,12–0,48 0,29±0,11 0,28 ^{B, E}	76,00–185,00 116,92±26,33 124,00 ^B
Участок поймы в устье р. Агапа, мышцы куропаток Floodplain area Agapa River mouth, muscles of willow ptarmigan							
Самцы Males	10	♂ min-max M±SD Med	0,82–0,95 0,89±0,04 0,89 ^{A, C, D}	4,50–10,40 6,22±1,59 5,85	0,16–0,23 0,18±0,02 0,18 ^F	0,41–0,54 0,46±0,04 0,46 ^{A, C, D}	74,00–123,00 96,60±13,93 95,00 ^D
Самки Females	10	♀ min-max M±SD Med	0,65–0,95 0,78±0,10 0,76 ^{A, B}	4,50–11,60 8,01±2,89 8,10	0,14–0,22 0,18±0,02 0,18 ^F	0,42–0,68 0,54±0,09 0,54 ^{A, B}	74,00–160,00 119,20±37,57 134,50 ^B
Участок поймы р. Новая у п. Новая, мышцы куропаток Floodplain area Novaya River, muscles of willow ptarmigan							
Самцы Males	23	♂ min-max M±SD Med	0,01–0,03 0,02±0,00 0,02 ^C	3,50–10,50 6,66±1,91 6,20	–	0,01–0,06 0,02±0,01 0,02 ^C	42,00–96,00 69,86±15,14 67,00 ^C
Самки Females	22	♀ min-max M±SD Med	0,01–0,03 0,01±0,00 0,02 ^B	4,50–11,60 7,32±2,16 6,45	–	0,02–0,06 0,02±0,01 0,03 ^B	32,00–96,00 73,22±19,03 82,50 ^B

Примечание: A – различия достоверны между самцами и самками (p<0,05); B – различия достоверны между самками по сравнению с фоновой территорией, участок поймы р. Новая у п. Новая (p<0,05); C – различия достоверны между самцами по сравнению с фоновой территорией, участок поймы р. Новая у п. Новая (p<0,05); D – различия достоверны между участками поймы в устье р. Агапа и поймы р. Верхняя Агапа (p<0,05); E – различия достоверны между участком поймы р. Верхняя Агапа и участком вблизи б. п. Ананыно (p<0,05); F – различия достоверны по сравнению с участком вблизи б. п. Ананыно (p<0,05); прочерк обозначает отсутствие данных.

Note: A – the differences are significant between males and females (p<0.05); B – the differences are significant between females in comparison with the background territory, the Novaya River floodplain area near Novaya village (p<0.05); C – the differences are significant between males compared to the background territory, the Novaya River (p<0.05); D – differences are significant between the Agapa River mouth floodplain area and Verkhnyaya Agapa River floodplain area (p<0.05); E – differences are significant between Verkhnyaya Agapa River floodplain area and territory near former village of Ananyino (p<0.05); F – differences are significant compared to territory near former village of Ananyino (p<0.05); a dash indicates no data.

свинца – в 9–26 раз; железа – в 1,6 раза. У самцов концентрация кадмия выше в среднем в 28–44 раза, свинца – в 13–32 раза; железа – в 2 раза. У самцов, добытых вблизи устья р. Агапа, отмечено повышенное ($p < 0,05$) содержание в мышцах свинца, кадмия и железа по сравнению с участками в пойме р. Верхняя Агапа. Имеются достоверные отличия по содержанию никеля и меди в мышцах птиц на разных участках импактных территорий (табл.).

Посредством однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA-test) выявлено достоверное ($p = 0,00$) влияние фактора территории на содержание в тканях белой куропатки всех исследуемых элементов.

Таким образом, значения концентраций микроэлементов в мышцах и печени белых куропаток указывают, что техногенные выбросы могут рассматриваться в качестве основного источника загрязнения биоты тяжёлыми металлами на севере Красноярского края.

На различных участках выявлены достоверные ($p < 0,05$) половые различия по содержанию в печени свинца и железа; в грудных мышцах – меди, кадмия и свинца (табл.).

Анализ корреляционных связей концентрации микроэлементов в мышечной ткани установил тесную достоверную связь ($p < 0,05$) в парах: Fe-Ni (от $r = 0,72$ у самок до $r = 0,74$ у самцов); Cu-Fe (от $r = -0,95$ у самцов до $r = -0,97$ у самок), Cd-Cu ($r = 0,75$ у самок и $r = -0,86$ у самцов), Cd-Fe ($r = -0,80$ у самок и $r = 0,71$ у самцов), Cd-Ni ($r = -0,67$ у самок и $r = 0,96$ у самцов). Отмечена значимая ($p < 0,05$) положительная корреляция содержания элементов в печени и мышечной ткани: Ni у самцов ($r = 0,93$), Cd у самок ($r = 0,68$). В печени самок отмечена сильная положительная связь между кадмием и свинцом ($r = 0,96$, $p < 0,01$) и отрицательная – в парах медь-железо ($r = -0,88$, $p < 0,01$) и медь-кадмий ($r = -0,66$, $p < 0,04$). Подобные связи, вероятно, определяются общими источниками загрязнения, а также взаимодействием (конкуренцией, синергизмом) биогенных и токсичных элементов в организме.

Повышенное ($p < 0,05$) содержание свинца и железа в грудной мускулатуре по сравнению с печенью может быть связано с загрязнением раневых тканей в результате отстрела свинцовой дробью, а также их повышенной кровенаполненностью.

Значительная доля проб печени и все пробы мышечной ткани куропаток импактных участков содержали количество кадмия или свинца, превышающее предельно допустимые

концентрации для пищевых продуктов (СанПиН 2.3.2.1078-01, Единые санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования ЕЭК от 28 мая 2010 г. № 299). Мясо и внутренние органы дичи, добытой на загрязнённых территориях, при употреблении в пищу могут представлять токсическую опасность для охотников и членов их семей.

Известно, что печень птиц аккумулирует свинец, никель, медь, кадмий и другие металлы, отражая уровень поступления их в организм. Индикаторная роль мышечной ткани несколько ниже, однако пищевая роль мяса определяет её значимость в экологотоксикологических исследованиях [16]. Полученные нами результаты отражают взаимосвязь содержания исследуемых элементов в организме белых куропаток и окружающей среде. Исследуемая территория расположена в зоне воздействия Норильского промышленного района, где сосредоточены крупнейшие предприятия металлургической и горнодобывающей промышленности, деятельность которых определяет до 1,9% ВВП Российской Федерации. По данным Федеральной службы государственной статистики и Министерства экологии и рационального природопользования Красноярского края, в атмосферу г. Норильска ежегодно поступает около 2,5 млн т загрязняющих веществ, существенную долю которых составляют тяжёлые металлы [17]. При этом значительная доля поллютантов аэрогенным путём распространяется на расстояние 250–400 км от места выброса, загрязняя водные источники, донные отложения и почвы, провоцируя деградацию растительности [18–20]. Выбросы предприятий Норильского промышленного района распространяются в северном и северо-западном направлениях, особенно быстро это происходит во время зимних метелей [21–22]. Скапливаясь в понижениях рельефа, загрязнённые снежные массы определяют повышенное поступление микроэлементов в кустарники и травянистые растения в период вегетации, а также наружное загрязнение побегов и коры. Именно эти участки служат важнейшими кормовыми станциями многих фитофагов.

Воздействие химического загрязнения на диких животных на севере Красноярского края неоднократно отмечалось и ранее [23, 24]. В организме мышевидных грызунов, обитающих на территории Норильского промышленного района, происходят аномальные изменения, предполагаемой причиной которых является воздействие загрязняющих веществ [25].

Кадмий характеризуется как один из наиболее опасных металлов из-за его стойкости и токсичности [26], способности к биоаккумуляции и биомагнификации [27]. Биодоступность кадмия для растений варьирует в зависимости от физико-химической формы и свойств субстрата [28]. Кроме того, кадмий может накапливаться различными видами растений-концентраторов, например, ивами (*Salix*) [29, 30], и распространяться по пищевым цепям, попадая в организм ассоциированных фитофагов [31, 32]. Высокие уровни кадмия обнаружены у тундряной (*Lagopus muta*) и белой куропатки (*Lagopus lagopus*) [29, 33–35], что связывают в первую очередь со спецификой сезонного питания. Установлено превышение ПДК кадмия без признаков его техногенного поступления на обследованную территорию, что объясняется миграционной активностью птиц [36, 37].

По данным [38], самые высокие концентрации микроэлементов у белой куропатки обнаружены в паренхиматозных органах. В сердце и грудных мышцах концентрации низкие. Содержание кадмия в почках было приблизительно в 7–10 раз больше, чем в печени. Содержание кадмия в мышцах заметно увеличивалось, когда в почках был превышен порог 75–80 мг/кг н. в.

В Норвегии средние уровни кадмия в почках взрослых особей белой куропатки колебались от 6,6 до 48,5 мкг/г н. в., при этом отдельные концентрации достигали 71,0 мкг/г [33]. Это один из самых высоких уровней содержания кадмия, зарегистрированных у диких птиц. При этом почки взрослых куропаток содержали в 3–10 и более раз больше кадмия, чем у сеголетков. В другом норвежском исследовании было установлено, что почки и печень взрослых белых куропаток содержали в 2–5 раз больше кадмия, чем у молодых птиц [39]. Основная доля кадмия накапливалась в организме белых куропаток в течение первой зимовки, а затем, после достижения определённого порогового уровня, его аккумуляция практически прекращалась. Так, если концентрации металла в печени и почках у 2–3-месячных птиц составляла соответственно 0,11 и 0,37 мг/кг, то перезимовавшие куропатки в возрасте 10–11 месяцев имели концентрацию токсиканта 5,2 мг/кг в печени и 21,1 мг/кг – в почках, а птицы в возрасте около 2 лет имели во внутренних органах концентрацию кадмия в печени и почках соответственно 3,8 мг/кг и 22,7 мг/кг [40]. Одним из источников поступления кадмия в организм куропаток считаются

почки и побеги некоторых видов ив (*Salix* sp.), накапливающие этот металл в значительно больших количествах, чем другие кормовые растения [29]. Активное потребление ивы вызывает значительное накопление кадмия у белохвостой куропатки (*Lagopus leucurus*) в Скалистых горах Колорадо, США [41]. Взрослые глухари из Северной Норвегии, которые в основном питаются сосновыми побегами, демонстрируют значительно более низкие концентрации кадмия в почках, чем взрослые белые куропатки из того же района, избирательно питающиеся ивой [42]. В питании белой куропатки на Таймыре отмечено преобладание побегов и почек карликовой берёзы и различных видов ив, доля которых в общем объёме пищи зимой достигает 95%. В период вегетации рацион включает листья дриады (*Dryas* sp.), брусники (*Vaccinium vitis-idaea*), багульника (*Ledum palustre*), толокнянки (*Arctostaphylos alpina*), андромеды (*Andromeda polifolia*), ягоды голубики (*Vaccinium uliginosum*), брусники, водяники (*Empetrum nigrum*) и толокнянки [43]. Ивы филиколистная (*Salix phylicifolia*), мохнатая (*S. lanata*) и прутьевидная (*S. viminalis*), являющиеся основными кормовыми объектами белой куропатки на территории исследований, могут быть основными концентраторами и источником тяжёлых металлов не только для птиц, но и для других видов, в частности, зайца-беляка [44, 45].

На севере Канады (Юкон) белые куропатки имели наибольшее содержание кадмия в мышечной мускулатуре по сравнению с другой боровой дичью, однако уровни металла не представляли опасности для здоровья потребителей [46]. В почках и печени куропаток на территории Нунавик средние концентрации кадмия составили 179,7 мкг/г с. в. и 25,8 мкг/г с. в. соответственно и были в три раза выше, чем у тундряной куропатки [36]. Авторы не предложили каких-либо ограничений в потреблении загрязнённой кадмием дичной продукции «поскольку имели недостаточно информации о потреблении почек и печени куропаток инуитами», а также не сочли возможным нарушать традиционную диету аборигенов.

Повышенный уровень кадмия в организме куропаток может нарушать жировой обмен опосредованно, влияя на выживаемость птицы во время миграции и размножения [47]. Половые различия микроэлементного состава организма белых куропаток могут определяться также спецификой обменных процессов птиц в репродуктивный период [48] и пространственной дифференциацией полов во время миграций. Так, на основании ана-

лиза промысловых проб из популяции белой куропатки Ямало-Ненецкого АО ($n=6475$), полученных в разные периоды миграции и в разных по широте районах, установлено, что во время зимних откочёвок птиц происходит частичное разделение их по полу. Самки первыми начинают откочёвку и мигрируют на большее расстояние [49]. Подобное явление наблюдалось в других регионах [50, 51].

В печени и почках белой куропатки в Норвегии свинец был обнаружен на всей территории страны, причём его содержание было значительно выше в южных, более обжитых регионах. Содержание меди коррелировало с химическим составом местных почв, хотя влияние металлургической промышленности также не исключалось [34, 52, 53]. Связь уровня загрязнения мышечной ткани тетеревиных птиц с территориальным фактором установлена в Якутии [54].

При обследовании костей и мышечной ткани белых куропаток, добытых охотниками в Квебеке (Канада), выявлено, что, хотя содержание свинца в костях различалось в зависимости от возраста и пола птиц, средние измеренные концентрации находились на фоновом для региона уровне (<6 мкг/г с. в.). Концентрация свинца в мышечной ткани была низкой, часто на пределе обнаружения. При этом высокие концентрации свинца в отдельных пробах, по мнению авторов исследования, были связаны с их загрязнением фрагментами свинцовой дроби в процессе отстрела, поскольку при исследовании желудков этих птиц свинцовая дробь не была обнаружена. На основании анализа риска для здоровья человека, связанного с потреблением мяса куропаток, сделан вывод, что использование свинецсодержащих боеприпасов для охоты на куриных птиц может представлять ненужный риск отравления свинцом из-за возможного проглатывания фрагментов дроби [55]. Отравление белых куропаток свинцом при заглатывании свинцовой дроби отмечено в дикой природе [39] и подтверждено экспериментально [56], однако в нашем случае каких-либо внешних признаков плумбизма [57] у добытых птиц зафиксировано не было.

Показано, что микроэлементный состав организма белой куропатки может существенно варьировать в связи с сезонной линькой, по-видимому, являющейся важным способом экстракции токсичных металлов [53, 58, 59]. Все эти данные свидетельствуют о необходимости продолжения исследований экологической

токсикологии тетеревиных птиц в различных регионах.

Заключение

На севере Красноярского края выявлены достоверные различия концентраций биогенных и токсичных элементов в печени и скелетной мускулатуре белых куропаток на фоновых территориях и участках, где отмечается промышленное загрязнение. При этом в организме птиц на загрязнённых территориях достоверно выше содержание свинца, кадмия и железа, а содержание меди не различалось.

Концентрации элементов в тканях печени и скелетной мускулатуре на импактных территориях высоко коррелировали друг с другом, что может быть связано с общими источниками эмиссии загрязняющих веществ.

Половые различия микроэлементного состава печени и мышечной ткани могут определяться пространственной дифференциацией полов во время миграций, сезонными особенностями питания и спецификой обменных процессов птиц в репродуктивный период.

В пробах печени и мышечной ткани с импактных территорий концентрация кадмия и свинца превышала существующие гигиенические параметры для пищевых продуктов, что может представлять угрозу для потребителей. Высокие уровни свинца и кадмия, вероятно, отражают повышенное содержание металлов в кормовых объектах, прежде всего побегах и почках ив, являющихся важнейшим зимним кормом белой куропатки.

Необходимо продолжить изучение влияния техногенного загрязнения территории северных регионов на гигиенические параметры мясо-дичной продукции в связи с её особой значимостью для коренных и малочисленных народов Севера.

Работа выполнена на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б.М. Житкова» в рамках выполнения Государственного задания по Программе ФНИ государственных академий наук на 2021-2024 гг. (код темы FNWS-2022-0001).

References

1. Mukhacheva S.V. Long-term dynamics of the small mammal communities in the period of reduction

- of copper smelter emissions. 1. Composition, abundance and diversity // *Ekologiya*. 2021. No. 1. P. 66–76 (in Russian). doi: 10.31857/S0367059721010108
2. Satarug S., Boonprasert K., Gobe G.C., Ruenweera-yut R., Johnson D.W., Na-Bangchang K., Vesey D. Chronic exposure to cadmium is associated with a marked reduction in glomerular filtration rate // *Clin. Kidney J.* 2018. V. 12. No. 4. P. 468–475. doi: 10.1093/ckj/sfy113
3. Helldbjerg H., Sunde P., Fox A.D. Continuous population declines for specialist farmland birds 1987–2014 in Denmark indicates no halt in biodiversity loss in agricultural habitats // *Bird Conserv. Int.* 2018. V. 28. No. 2. P. 278–292. doi: 10.1017/S0959270916000654
4. Kamp J., Frank C., Trautmann S., Busch M., Dröschmeister R., Flade M., Gerlach B., Karthäuser J., Kunz F., Mitschke A., Schwarz J., Sudfeldt Ch. Population trends of common breeding birds in Germany 1990–2018 // *J. Ornithol.* 2021. V. 162. P. 1–15. doi: 10.1007/s10336-020-01830-4
5. Rigal S., Dakos V., Alonso H., Auniņš A., Benkő Z., Brotons L., Chodkiewicz T., Chylarecki P., de Carli E., Del Moral J.C., Domşa C., Escandell V., Fontaine B., Foppen R., Gregory R., Harris S., Herrando S., Husby M., Ieronymidou C., Jiguet F., Kennedy J., Klvaňová A., Kmecl P., Kuczyński L., Kurlavičius P., Kålås J.A., Lehikoinen A., Lindström Å., Lorrillière R., Moshøj C., Nellis R., Noble D., Eskildsen D.P., Paquet J.Y., Péliissié M., Pladevall C., Portolou D., Reif J., Schmid H., Seaman B., Szabo Z.D., Szép T., Florenzano G.T., Teufelbauer N., Trautmann S., van Turnhout C., Vermouzek Z., Vikstrøm T., Voříšek P., Weiserbs A., Devictor V. Farmland practices are driving bird population decline across Europe // *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 2023. V. 120. No. 21. Article No. e2216573120. doi: 10.1073/pnas.2216573120
6. Rosenberg K.V., Dokter A.M., Blancher P.J., Sauer J., Smith A.C., Smith P.A., Stanton J.C., Panjabi A., Helft L., Parr M., Marra P.P. Decline of the North American avifauna // *Science*. 2019. V. 366. P. 120–124. doi: 10.1126/science.aaw1313
7. Dietz R., Letcher R.J., Desforges J.-P., Eulaers I., Sonne C., Wilson S., Andersen-Ranberg E., Basu N., Barst B.D., Bustnes J.O., Bytingsvik J., Ciesielski T.M., Drevnick P.E., Gabrielsen G.W., Haarr A., Hylland K., Jenssen B.M., Levin M., McKinney M.A., Nørregaard R.D., Pedersen K.E., Provencher J., Styriehave B., Tartu S., Aars J., Ackerman J.T., Rosing-Asvid A., Barrett R., Bignert A., Born E.W., Branigan M., Braune B., Bryan C.E., Dam M., Eagles-Smith C.A., Evans M., Evans T.J., Fisk A.T., Gamberg M., Gustavson K., Hartman C.A., Helander B., Herzog M.P., Hoekstra P.F., Houde M., Hoydal K., Jackson A.K., Kucklick J., Lie E., Loseto L., Mallory M.L., Miljeteig C., Mosbech A., Muir D.C.G., Nielsen S.T., Peacock E., Pedro S., Peterson S.H., Polder A., Rigét F.F., Roach P., Saunes H., Sinding M.-H.S., Skaare J.U., Søndergaard J., Stenson G., Stern G., Treu G., Schuur S.S., Vikingsson G. Current state of knowledge on biological effects from contaminants on arctic wildlife and fish // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 696. Article No. 133792. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133792
8. Battakhov P.P. Environmental protection during mining in the Arctic: legal aspects // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 1. P. 179–185 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-179-185
9. Toman R., Massányi P. Cadmium in selected organs of fallow-deer (*Dama dama*), sheep (*Ovis aries*), brown hare (*Lepus europaeus*) and rabbit (*Oryctolagus cuniculus*) in Slovakia // *J. Environ. Sci. Health. Part A Environ. Sci. Eng. Toxicol.* 1996. V. 31. No. 5. P. 1043–1051. doi: 10.1080/10934529609376406
10. Saveljev A., Sergeyev A., Grebnev I., Chirkov S., Sotnikov V. The hunting resources of a green belt of a big city in the East of Europe: number, sanitary parameters, and possibilities of sustainable harvest // *Beiträge zur Jagd- und Wildforschung*. 2013. V. 38. P. 300–311.
11. Pavlov B.M., Yakushkin G.D. Abundance and trade of the willow *Lagopus lagopus* and rock *L. mutus* ptarmigans in the Taimyr National District // *Russkij ornitologicheskij zhurnal*. 2019. V. 28. No. 1861. P. 5827–5829 (in Russian).
12. Lebedev P.T., Usovich A.T. Methods for studying animal feed, organs and tissues. Moskva: Rossel'hozizdat, 1976. 389 p. (in Russian).
13. Ivanter E.V., Korosov A.V. Basic biometrics. Petrozavodsk: PetrGU, 2005. 104 p. (in Russian).
14. Borovikov V. Statistica: The art of data analysis on a computer. For professionals. Sankt-Peterburg: Piter, 2001. 656 p. (in Russian).
15. Rokitskiy P.F. Biological Statistic. Minsk: Vysshaya shkola, 1964. 328 p. (in Russian).
16. Potthast K. Residues in meat and meat products // *Fleischwirtsch.* 1993. V. 73. P. 432–434.
17. State report of the Ministry of Ecology and Rational Natural Resources Management of the Krasnoyarsk Region “On the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk Region for 2022”. Krasnoyarsk: KGBU “TSRMPiOOS”, 2023. 367 p.
18. Lobkovskiy V.A., Lobkovskaya L.G. The ecological situation around the arrangement of the enterprises of the polar branch of the MMC Norilsk Nickel: current state and forecast // *Problemy regional'noj ekologii*. 2015. No. 5. P. 40–43 (in Russian).
19. Bazova M.M., Koshevoj D.V. The assessment of the current state of water quality in the Norilsk industrial region // *Arktika: ekologiya i ekonomika*. 2017. V. 27. No. 3. P. 49–60 (in Russian). doi: 10.25283/2223-4594-2017-3-49-60
20. May I.V., Kleyn S.V., Vekovshina S.A., Balashov S.Yu., Chetverkina K.V., Tsinker M.Yu. Health risk for the population of Norilsk due to exposure to air pollutants // *Gigiena i sanitariya*. 2021. V. 100. No. 5. P. 528–534 (in Russian). doi: 10.47470/0016-9900-2021-100-5-528-534
21. Onuchin A.A., Burenina T.A., Zubareva O.N., Trefilova O.V., Danilova I.V. Snow pollution in Norilsk industrial area // *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*. 2014. V. 21. No. 6. P. 1025–1037 (in Russian).
22. Lezhenin A.A., Raputa V.F., Yaroslavceva T.V. Numerical analysis of atmospheric circulation and pollution transport in vicinity of the Norilsk industrial region // *Optika*

- atmosfery i okeana. 2016. No. 6. P. 467–471 (in Russian). doi: 10.15372/AOO20160603
23. Skugland T., Baskin L.M., Espelien I.S., Strand U. Content of heavy and radioactive metals in the body of reindeer from different populations // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya. 1997. No. 6. P. 19–24 (in Russian).
24. Ermolov Yu.V., Lebedeva M.A., Bondar M.G., Kolphashchikov L.A., Cherevko A.S., Smolencev N.B. Accumulation of chemical elements in the biochemical food chain of the Northern Norilsk plateau // Geohimiya. 2020. V. 65. No. 5. P. 499–510 (in Russian). doi: 10.31857/S0016752520040032
25. Kireeva A.V., Kolenchukova O.A., Peretyat'ko O.V., Savchenko A.P., Temerova V.L., Emel'yanov V.I. Morphological assessment of organs and tissues of small mammals living in the industrial area of Norilsk // Sibirskij ekologicheskij zhurnal. 2023. V. 30. No. 3. P. 330–342 (in Russian). doi: 10.15372/SEJ20230310
26. Battaglia A., Ghidini S., Campanini G., Spaggiari R. Heavy metal contamination in little owl (*Athene noctua*) and common buzzard (*Buteo buteo*) from northern Italy // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2005. V. 60. No. 1. P. 61–66. doi: 10.1016/j.ecoenv.2003.12.019
27. Burger J. Assessment and management of risk to wildlife from cadmium // Sci. Total Environ. 2008. V. 389. No. 1. P. 37–45. doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.08.037
28. Efrogmson R.A., Sample B.E., Suter G.W. Bioaccumulation of inorganic chemicals from soil by plants: Spiked soils vs. field contamination or background // Hum. Ecol. Risk Assess.: Int. J. 2004. V. 10. No 6. P. 1117–1127. doi: 10.1080/10807030490887177
29. Myklebust I., Nybø S., Kålås J.A., Pedersen H.C. Cadmium accumulation in willow ptarmigan (*Lagopus lagopus*) and rock ptarmigan (*Lagopus mutus*) in Central Norway // Sci. Total Environ. 1993. V. 134. No. 1. P. 135–139. doi: 10.1016/S0048-9697(05)80012-9
30. Simon L., Martin H.W., Adriano D.C. Chicory (*Cichorium intybus* L.) and dandelion (*Taraxacum officinale* Web.) as phytoindicators of cadmium contamination // Water Air Soil Pollut. 1996. V. 91. P. 351–362. doi: 10.1007/BF00666269
31. Hillis T.L., Parker G.H. Age and proximity to local ore-smelters as determinants of tissue metal levels in beaver (*Castor canadensis*) of the sudbury (Ontario) area // Environ. Pollut. 1993. V. 80. No. 1. P. 67–72. doi: 10.1016/0269-7491(93)90011-c
32. Nolet B.A., Dijkstra V.A.A., Heidecke D. Cadmium in beavers translocated from the Elbe River to the Rhine/Meuse estuary, and the possible effect on population growth rate // Arch. Environ. Contam. Toxicol. 1994. V. 27. No. 2. P. 154–161. doi: 10.1007/BF00214257
33. Wren C.D., Nygård T., Steinnes E. Willow ptarmigan (*Lagopus lagopus*) as a biomonitor of environmental metal levels in Norway // Environ. Pollut. 1994. V. 85. No. 3. P. 291–295. doi: 10.1016/0269-7491(94)90050-7
34. Pedersen H.C., Fosøy F., Kålås J.A., Lierhagen S. Accumulation of heavy metals in circumpolar willow ptarmigan (*Lagopus l. lagopus*) populations // Sci. Total Environ. 2006. V. 371. No. 1–3. P. 176–189. doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.09.005
35. Johnsen T.V., Systad G.H., Jacobsen K.O., Nygård T., Bustnes J.O. The occurrence of reindeer calves in the diet of nesting Golden Eagles in Finnmark, northern Norway // Ornis Fennica. 2007. V. 84. P. 112–118.
36. Rodrigue J., Champoux L., Leclair D., Duchesne J.F. Cadmium concentrations in tissues of willow ptarmigan (*Lagopus lagopus*) and rock ptarmigan (*Lagopus muta*) in Nunavik, Northern Québec // Environ. Pollut. 2007. V. 147. No. 3. P. 642–647. doi: 10.1016/j.envpol.2006.10.017
37. Kochkarev P.V. The role of the ptarmigan (*Lagopus lagopus* Montin. 1776) caecum in the regulation process of microelement structure // Vestnik KrasGAU. 2014. No. 10. P. 122–126 (in Russian).
38. Myklebust I., Pedersen H.C. Accumulation and distribution of cadmium in willow ptarmigan // Ecotoxicol. 1999. V. 8. P. 457–465.
39. Fimreite N. Effects of lead shot ingestion in willow grouse // Bull. Environ. Contam. Toxicol. 1984. V. 33. No. 1. P. 121–126. doi: 10.1007/BF01625520
40. Pedersen H.C., Myklebust J. Age dependent accumulation of cadmium in norwegian willow ptarmigan (*Lagopus lagopus*) // Proceedings of the 20th Congress of the International Union of Game Biologists. Gödöllő, Hungary, August 21–26, 1991. Budapest: Nimrod and Hubertus GMBH, 1991. P. 477–482.
41. Larison J.R., Likens G.E., Fitzpatrick J.W., Crock J.G. Cadmium toxicity among wildlife in the Colorado Rocky Mountains // Nature. 2000. V. 406. No. 6792. P. 181–183. doi: 10.1038/35018068
42. Kålås J.A., Ringsby T.H., Lierhagen S. Metals and radicesium in wild animals from the Sør-Varanger area, North Norway // NINA Oppdragsmelding. 1993. V. 212. P. 1–26.
43. Pavlov B.M. About the nutrition of willow ptarmigan and rock ptarmigan in Taimyr during the snowy season // Russkij ornitologicheskij zhurnal. 2020. V. 29. No. 1874. P. 162–164 (in Russian).
44. Norris C., Norris E., Myrberget S. Food preference of captive willow grouse *Lagopus lagopus* // Fauna Norv. Ser. C Cinclus. 1979. V. 2. No. 49–52.
45. Kochkarev P.V., Koshurnikova M.A., Sergeyev A.A., Shiryaev V.V. Trace elements in the meat and internal organs of the mountain hare (*Lepus timidus* L., 1758) in the North of the Krasnoyarsk Region // Food Processing: Techniques and Technology. 2023. V. 53. No. 2. P. 312–325 (in Russian). doi: 10.21603/2074-9414-2023-2-243646.
46. Braune B.M., Malone B.J. Organochlorines and trace elements in upland game birds harvested in Canada // Sci. Total Environ. 2006. V. 363. No. 1–3. P. 60–69. doi: 10.1016/j.scitotenv.2005.06.011
47. Jensen M., Poulsen R., Langebæk R., Jenssen B.M., Moe J., Ciesielski T.M., Dietz R., Sonne C., Madsen J., Hansen M. The metabolome of pink-footed goose: Heavy metals and lipid metabolism // Environ. Res. 2023. V. 231. Pt. 1. Article No. 116043. doi: 10.1016/j.envres.2023.116043
48. Sandercock B.K., Martin K., Hannon S.J. Demographic consequences of age-structure in extreme environments: population models for arctic and alpine

- ptarmigan // *Oecologia*. 2005. V. 146. No. 1. P. 13–24. doi: 10.1007/s00442-005-0174-5
49. Piminov V.N. Spatial differentiation of sexes in willow ptarmigan // *Ekologiya i resursy ohotnich'epromyslovyh ptic*. 1989. P. 60–69 (in Russian).
50. Andreev A.V. Willow ptarmigan *Lagopus lagopus* in northern Asia: population instability caused by autecological perfection // *Russkiy ornitologicheskiy zhurnal*. 1999. No. 67. P. 3–18 (in Russian).
51. Hoffman R.W. White-tailed ptarmigan (*Lagopus leucura*): a technical conservation assessment. USDA Forest Service, Rocky Mountain Region. 2006. 72 p. [Internet recourse] <http://www.fs.fed.us/r2/projects/scp/assessments/whitetailedptarmigan.pdf> (Accessed: 07.04.2024).
52. Pedersen H.C., Myklebust I. Age-dependent accumulation of cadmium and zinc in the liver and kidneys of Norwegian willow ptarmigan // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 1993. V. 51. P. 381–388. doi: 10.1007/BF00201756
53. Pedersen H.C., Lorås A., Andersen R.A., Jensen B.M. Behavioural effects of cadmium (Cd) in free-living willow ptarmigan (*Lagopus lagopus*) // *Eur. J. Wildl. Res.* 2010. V. 56. P. 141–150. doi: 10.1007/s10344-009-0295-y
54. Petrova E.M. Research of the content of heavy metals in the muscle tissue of (*Tetraoninae Vigors, 1825*) in different ecological zones of the Republic of Sakha (Yakutia) // *Vestnik IrGSHA*. 2020. V. 101. P. 82–87 (in Russian). doi: 10.51215/1999-3765-2020-101-82-87
55. Rodrigue J., McNicoll R., Leclair D., Duchesne J.F. Lead concentrations in Ruffed Grouse, Rock Ptarmigan, and Willow Ptarmigan in Québec // *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 2005. V. 49. No. 1. P. 97–104. doi: 10.1007/s00244-003-0265-4
56. Gjerstad K., Hanssen I. Experimental lead poisoning in willow ptarmigan // *J. Wildl. Manage.* 1984. V. 48. No. 3. P. 1018–1022. doi: 10.2307/3801460
57. Sergeev A.A., Shiryayev V.V., Dvornikov M.G., Tetera V.A. Lead poisoning of wild animals and prospects for the use of non-toxic hunting ammunition in Russia // *Dal'nevostochnyj agrarnyj vestnik*. 2020. No. 1 (53). P. 71–83 (in Russian). doi: 10.24414/1999-6837-2020-11010
58. Braune B.M., Gaskin D.E. A mercury budget for the Bonaparte's gull during autumn moult // *Ornis Scand.* 1987. V. 18. No. 4. P. 244–250. doi: 10.2307/3676891
59. Pedersen H.C., Myklebust I., Nygård T., Sæther M. Accumulation and effects of cadmium in willow ptarmigan // *NINA Oppdragsmelding*. 1992. V. 152. P. 1–27.