

Сравнительный анализ накопления свинца и кадмия в органах и тканях сизого голубя в условиях эксперимента

Е.Г. ТЮЛЬКОВА

В статье исследуется уровень накопления свинца и кадмия в печени, почках, сердце, мышечной и костной ткани, а также перьях и экскрементах сизых голубей в условиях экспериментального скормливания токсикантов с кормом. В результате проведенного сравнительного анализа установлены более высокие уровни накопления кадмия в организме птиц по сравнению со свинцом, менее интенсивное его удаление из организма, а также более высокий уровень зависимости накопления кадмия в организме птиц от величины поступления с кормом по сравнению со свинцом.

Ключевые слова: свинец, кадмий, индикация, накопление, перья, внутренние органы и ткани птиц

In the article the level of lead and cadmium accumulation in a liver, kidneys, heart, muscular and bone fabric, and also feathers and excrement of blue rock pigeons in the experimental conditions of feeding of toxicants with the food is investigated.

As a result of the comparative analysis higher levels of cadmium accumulation in birds' organism in comparison with lead, its less intensive removal from an organism, and also a higher level of dependence of the accumulation of cadmium in organism of birds on the amount of cadmium in feed compared to lead are established.

Keywords: lead, cadmium, indication, accumulation, feathers, internal birds bodies and fabrics

Введение. Свинец и кадмий наряду с ртутью, мышьяком, медью, оловом, цинком и железом входит в перечень наиболее опасных токсичных элементов, обязательных для контроля в сфере международной торговли в соответствии с решением объединенной комиссии ФАО (Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН) и ВОЗ (Всемирная организация здравоохранения).

Свинец и кадмий широко используются в машиностроении и металлообработке, стекольном производстве, выделяются при сжигании топлива и промышленных отходов. В живых организмах для этих металлов отсутствует механизм гомеостатического контроля; кроме того, они способны длительно удерживаться в организме, аккумулируясь в костях, почках и печени. Хроническое отравление свинцом и кадмием приводит к нарушениям функций почек, синтеза нуклеиновых кислот и белков, анемии, легочной недостаточности, остеомалации.

Использование птиц в качестве индикаторов для оценки степени загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами через их накопление в организме достаточно перспективно в связи с их широчайшим распространением и с тем, что многие виды являются высшими звеньями трофических цепей, поэтому содержание тяжелых металлов в их тканях и органах может достигать больших величин и иметь интегративный характер [1]–[8].

Возможность измерений уровней накопления тяжелых металлов у свободноживущих птиц с одновременным исследованием их содержания в окружающей среде и потребляемом корме лимитируется многими объективными причинами. Поэтому выглядит наиболее целесообразным и корректным выяснение закономерностей накопления тяжелых металлов, поступающих в организм птиц, осуществлять в условиях эксперимента, что и явилось научной идеей при его постановке.

Цель исследования – установить локализацию, уровни содержания тяжелых металлов, а также закономерности их накопления в организме птиц, обитателей урбанизированных территорий (на примере сизого голубя), для последующего использования при оценке степени техногенного загрязнения окружающей природной среды.

Материал и методы. С целью экспериментального установления закономерностей формирования различных концентраций тяжелых металлов в органах, тканях и перьевом

покрове птиц, искусственно задавая определенные уровни поступления в организм с кормом, использовались сизые голуби городской популяции г. Минска. Всего было сформировано 10 групп птиц: 1-я – контрольная, 2–10-я – опытные. Каждая группа состояла из 3 птиц.

Выбор свинца и кадмия обусловлен отсутствием их доказанной физиологической значимости в организме, высокой токсичностью (особенно кадмия), способностью в сравнительно малых количествах вызывать гибель или аномалии развития, в том числе и на эмбриональном уровне.

Перед началом эксперимента были извлечены перья птиц: по 4 рулевых и по 2 маховых с каждой стороны. Во время эксперимента каждую птицу содержали отдельно. Свинец и кадмий вводили с хлебом в виде растворов солей $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Pb} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ и $\text{CdCl}_2 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$. Размеры скармливаемых доз элементов рассчитывались на элемент исходя из установленных в Республике Беларусь ветеринарно-санитарными норм по безопасности кормов и кормовых добавок, размеров предельно-допустимых концентраций (для свинца – 5 мг/кг корма, для кадмия – 0,4 мг/кг) с учетом средней массы корма, ежедневно съедаемого птицей. Таким образом, дозы свинца и кадмия (в мг соли) составили: 1 Pb – 0,32 мг соли, 5 Pb – 1,6 мг, 10 Pb – 3,2 мг, 20 Pb – 6,4 мг, 10 Cd – 0,28 мг, 20 Cd – 0,57 мг, 30 Cd – 0,84 мг. Выбор вводимой с кормом дозы кадмия в 10 – 30 ПДК обусловлен необходимостью сравнительного анализа уровней накопления свинца и кадмия в органах и тканях при более низком значении ПДК в корме для кадмия по сравнению со свинцом.

Птицы контрольной группы получали в процессе эксперимента только корм; птицы 2–10-й опытных групп получали дополнительно с кормом и хлебом растворы солей перечисленных концентраций свинца и кадмия. Птицы 2-й группы получали с хлебом раствор соли, содержащий 1 дозу ПДК по свинцу, 3-й группы – дозу, превышающую ПДК по свинцу в 5 раз, 4-й группы – дозу, превышающую ПДК по свинцу в 10 раз, 5-й группы – дозу, превышающую ПДК по свинцу в 20 раз. Аналогичным образом скармливались растворы, превышающие ПДК по кадмию в 10, 20 и 30 раз.

В состав кормовой смеси входили зерно злаковых культур, шрот подсолнечный, мука кормовая, мел, фосфат, премикс, соль, авизим.

Ежедневно осуществлялся сбор экскрементов.

Свинец и кадмий прекратили вводить в рацион в тот момент времени, когда на месте извлеченных перьев сформировались новые, которые также были извлечены. Кроме того, в конце эксперимента были извлечены также и старые перья птиц по такой же схеме, как и перья до начала эксперимента. По окончании введения свинца и кадмия птицы были усыплены, а их органы, ткани (печень, почки, сердце, мышечная и костная ткани), а также перья и экскременты подверглись исследованиям.

Анализ содержания свинца и кадмия в перечисленных органах, тканях и экскрементах сизых голубей проводились в химико-аналитической испытательной лаборатории Научно-практического центра НАН Беларуси по биоресурсам методом индуктивно сопряженной плазменной масс-спектрометрии и вычислялись как среднее арифметическое результатов 3-х параллельных определений в пределах отдельной дозы в каждом органе и ткани.

Подготовка проб осуществлялась методом мокрой минерализации в присутствии концентрированных соляной и серной кислот.

Количество свинца и кадмия на абсолютно сухую массу исследуемых тканей, органов определяли с учетом массовой доли влаги печени (74,1%), почек (74,0%), сердца (80,0%), мышечной ткани (76,0%), костной ткани (30,0%), экскрементов (50,0%), а также массы навесок исследованных органов и тканей, использованных в процессе подготовки проб. При обработке результатов по перьям их массовая доля влаги в расчетах не учитывалась вследствие малых величин.

Всего проанализировано 220 проб органов и тканей сизого голубя, 140 проб экскрементов и определены коэффициенты накопления свинца и кадмия как отношение содержания элементов в сыром веществе внутренних органов, а также костях, перьях и экскрементах к общему количеству свинца и кадмия, поступившему с кормом, выраженное в процентах.

Также в работе были получены коэффициенты корреляции и уравнения линейной регрессии между содержанием свинца и кадмия в корме и их количеством в исследованных тканях, органах птиц и проведена оценка достоверности предлагаемых зависимостей.

Обработка данных результатов исследований осуществлялась с использованием редактора Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение. Результаты экспериментального скармливания сизым голубям 1–20 доз свинца показали наибольшие уровни накопления данного элемента в костях и новом оперении птиц, что, возможно, связано с депонирующей микроэлементной функцией костей и наличием очага активных регенерационных процессов в области растущего оперения. Далее по мере снижения уровня накопления свинца следуют старые перья после окончания эксперимента, почки, печень, мышцы и сердце (таблица 1).

Следует отметить, что по мере увеличения количества свинца в корме от 1 до 20 доз уровни накопления его в костях также закономерно возрастали.

Что касается других исследованных органов и тканей, то в сердце и мышцах не проявлялось четкой зависимости величины накопления от количества поступаемого в организм токсиканта. Можно предположить, что в данном случае проявляется существование какого-то порогового уровня, до которого проникновение свинца в мышцы успешно блокируется в организме. Однако такое предположение требует более глубокой экспериментальной проверки.

Таблица 1 – Содержание свинца в тканях и внутренних органах сизого голубя

Количество доз свинца	Содержание свинца, мкг/г сухого вещества							
	кости	почки	печень	мышцы	сердце	экскременты	перья	
							новые	старые после эксперимента
1 Рb	10,936± 0,0212	0,211± 0,0004	0,056± 0,0002	0,171± 0,0004	0,025± 0,0007	15,773± 0,023	0,236± 0,0004	1,057± 0,0029
5 Рb	12,801± 0,0194	1,372± 0,0031	0,539± 0,0007	0,039± 0,0002	0,019± 0,0003	53,859± 0,240	1,041± 0,0026	1,885± 0,0055
10 Рb	20,759± 0,0311	1,901± 0,0026	0,732± 0,0013	0,071± 0,0009	0,015± 0,0001	83,778± 0,459	3,477± 0,0047	5,786± 0,0080
20 Рb	31,741± 0,0254	6,258± 0,0137	2,404± 0,0028	0,150± 0,0007	0,091± 0,0002	235,273 ± 1,965	20,856± 0,0116	6,576± 0,0148
контроль	5,064± 0,0159	0,142± 0,0003	0,064± 0,0005	0,016± 0,0001	0,025± 0,00003	0,477± 0,002	0,039± 0,0001	0,054± 0,0002

Иная ситуация прослеживается с накоплением свинца органами выделительной системы. В пределах градиента задаваемой концентрации в корме 1–20 Рb происходило закономерное увеличение содержания токсиканта в печени и почках. При этом абсолютные показатели накопления в почках примерно в 2–2,5 раза были выше, чем в печени.

В растущих перьях свинец накапливался вначале менее интенсивно, но затем при 20 дозах в корме происходил резкий скачок накопления, значительно превышающий таковое в старых перьях. Можно предположить, что усиление токсической нагрузки стимулирует функции выведения свинца из организма путем его депонирования в оперении. Тем не менее, при росте нового оперения, т. е. в очаге активных регенерационных процессов, накопление свинца происходит слабее, но только до какого-то определенного порогового значения интенсивности поступления токсиканта в организм. Резкое увеличение накопления растущим оперением свинца при его поступлении в раз-
мере 20 доз позволяет предположить наличие различных механизмов или путей детоксикации организма птиц.

В целом, в пределах скармливаемых доз установлено увеличение содержания свинца в костях в 2,2–9,2 раза по сравнению с контролем, в почках – в 1,5–44,1 раза, в печени – в 0,9–37,6 раза, в мышцах – в 9,4–10,7 раза, в сердце – в 3,6 раза, в новых перьях – в 6,1–534,8 раза, в старых перьях после окончания эксперимента – в 19,6–121,8 раза.

Характер изменения содержания свинца в экскрементах при его различных дозах скармливания свидетельствует об увеличении выведения токсиканта из организма при росте вводимой дозы.

В результате экспериментального скармливания сизым голубям 10–30 доз кадмия выявлена иная картина распределения металла в организме птиц по сравнению со свинцом (таблица 2).

Таблица 2 – Содержание кадмия в тканях и внутренних органах сизого голубя

Количество доз кадмия	Содержание кадмия, мкг/г сухого вещества							
	кости	почки	печень	мышцы	сердце	экскременты	перья	
							новые	старые после эксперимента
10 Cd	0,084± 0,00017	10,836± 0,0311	2,136± 0,0074	0,057± 0,0005	0,037± 0,00004	3,126± 0,017	0,266± 0,0004	0,095± 0,0008
20 Cd	0,094± 0,00046	17,728± 0,0289	5,038± 0,0187	0,076± 0,0004	0,038± 0,00008	6,600± 0,062	0,441± 0,0008	0,734± 0,0011
30 Cd	0,097± 0,00043	37,403± 0,0867	6,933± 0,0172	0,084± 0,0007	0,112± 0,00029	10,946± 0,046	0,693± 0,0007	0,650± 0,0072
контроль	0,016± 0,00004	2,270± 0,0093	0,142± 0,0002	0,029± 0,00006	0,023± 0,0011	0,032± 0,00005	0,00004± 0,000001	0,0005± 0,00002

Наибольшие уровни металла отмечаются в почках птиц, что, возможно, связано с их функцией выведения.

При этом уровень содержания кадмия в почках даже контрольной группы птиц был достаточно высок относительно других органов. Как ранее уже было сказано, птицы для эксперимента были взяты из городской среды, и это объясняет такие существенные изначальные уровни содержания кадмия в их почках.

Далее по мере снижения уровня накопления кадмия следуют печень, новые перья, старые перья после окончания эксперимента, кости, мышцы и сердце.

Из представленных результатов видно, что содержание кадмия в мышцах и костях постепенно возрастало по мере увеличения скармливаемых с кормом доз, тогда как в сердце, печени и почках скармливание 30 доз кадмия обусловило резкий скачок содержания токсиканта по сравнению с предыдущими дозами и контролем, что показывает более интенсивную реакцию этих органов на введение повышенных доз токсиканта.

Необходимо отметить особенность динамики накопления кадмия, обнаруживаемую при сравнении новых, отрастающих в период эксперимента, и старых перьев. Как в одних, так и в других содержание кадмия возрастало в ряду увеличения скармливаемой дозы. Однако динамика накопления имела явные различия. Если для новых перьев характерно постепенное и равномерное возрастание показателей содержания кадмия с увеличением вводимой дозы, то в старых перьях элемент накапливался вначале более интенсивно, но затем при 30 дозах происходит незначительное снижение накопления, причем при максимальной дозе в корме в 30 ПДК уровень содержания в пере примерно в 1300 раз превысил показатель в контроле. В результате новые перья накапливали более высокие уровни кадмия относительно контрольного значения. Как и в случае со свинцом, можно предположить, что усиление токсической нагрузки стимулирует функции выведения кадмия из организма путем его депонирования в оперении. Тем не менее, при росте нового оперения, т. е. в очаге активных регенерационных процессов, накопление кадмия происходит более интенсивно.

Сравнение уровней накопления кадмия в органах, тканях и покровах экспериментальных птиц с показателями в экскрементах при различных дозах скармливаемого токсиканта показало более высокую концентрацию кадмия в почках птиц по сравнению с экскрементами и другими органами и тканями (таблица 2), что, в принципе, отражает общую функциональную эффективность выделительной системы организма.

Факт накопления кадмия в отличие от свинца в организме птиц в большем количестве, чем удаление с экскрементами негативен для организма птиц, что дополнительно усугубляется большей токсичностью кадмия по сравнению со свинцом.

В целом, содержание кадмия при скармливании доз от 10 Cd до 30 Cd возрастает в почках в 4,8–16,5 раза по сравнению с контрольной группой, в костях – в 5,3–6,1 раза, в печени – в 15,0–48,8 раза, в мышцах – в 2,0–2,9 раза, в сердце – в 1,6–4,9 раза, в новых перьях – в 6650,0–17325,0 раза, в старых перьях после окончания эксперимента – в 190,0–1300,0 раза.

Коэффициенты накопления свинца и кадмия определяли как отношение содержания элемента в сыром веществе тканей и органов, а также костях и перьях к общему количеству свинца и кадмия, поступившего с кормом, выраженное в процентах. Для этого рассчитывалось общее количество свинца и кадмия за весь период эксперимента (1 Pb – 14,4 мг, 5 Pb – 72,0 мг, 10 Pb – 144,0 мг, 20 Pb – 288,0 мг, 10 Cd – 12,6 мг, 20 Cd – 25,6 мг, 30 Cd – 37,8 мг); средняя масса исследуемых органов и тканей (кости – 41,3 г, почки – 2,88 г, печень – 7,65 г, мышцы – 93,34 г, сердце – 4,54 г, перья новые – 1,62 г, перья старые после эксперимента – 22,87 г, экскременты – 8,76 г) и массовая доля влаги исследуемых органов и тканей (отмечена выше).

Таблица 3 – Коэффициенты накопления свинца и кадмия в тканях и органах сизого голубя

Металлы	Коэффициенты накопления свинца и кадмия, %							
	кости	почки	печень	мышцы	сердце	экскременты	перья	
							новые	старые после эксперимента
свинец	1,231	0,019	0,018	0,131	0,001	1,420	0,005	0,093
кадмий	0,018	0,939	0,542	0,126	0,006	0,465	0,003	0,041

Такая тенденция, возможно, объясняется образованием более устойчивых комплексных соединений кадмия в организме ($K_{\text{нест.}} = 10^{-7}-10^{-3}$ для свинца и $10^{-17}-10^{-3}$ для кадмия [9]) и в этой связи более медленным их удалением с экскрементами в процессе метаболизма по сравнению со свинцом.

Таблица 4 – Коэффициенты корреляции и уравнения линейной регрессии содержания свинца и кадмия в органах и тканях сизого голубя (Y) и его концентрации в корме (X)

Органы, ткани, экскременты	Коэффициенты корреляции	Уравнения линейной регрессии
почки	0,974	$Y = -0,397 + 0,034 \times X$
	0,953	$Y = -4,57 + 1,65 \times X$
печень	0,977	$Y = -0,162 + 0,013 \times X$
	0,980	$Y = -0,089 + 0,30 \times X$
сердце	0,801	$Y = 0,0045 + 0,0004 \times X$
	0,857	$Y = -0,012 + 0,005 \times X$
новые перья	0,947	$Y = -3,7 + 0,123 \times X$
	0,989	$Y = 0,039 + 0,027 \times X$
старые перья в конце эксперимента	0,911	$Y = 1,058 + 0,034 \times X$
	0,767	$Y = -0,072 + 0,035 \times X$
экскременты	0,850	$Y = -6,65 + 1,26 \times X$
	0,823	$Y = -0,96 + 0,49 \times X$

Примечание – В таблице представлены данные по достоверным коэффициентам корреляции и уравнениям регрессии: в числителе – по свинцу, в знаменателе – по кадмию

Сравнение коэффициентов корреляции и регрессии по свинцу и кадмию в корме и тканях и органах демонстрирует превышение коэффициента корреляции для кадмия в печени, сердце и новых перьях и коэффициента регрессии – в почках, печени и сердце (таблицы 4–5).

Таблица 5 – Коэффициенты корреляции содержания свинца и кадмия в органах и тканях сизого голубя (Y) в зависимости от его концентрации в корме (X)

Органы, ткани, экскременты птиц	свинец		кадмий	
	Коэффициенты корреляции	t_{st} независимой переменной	Коэффициенты корреляции	t_{st} независимой переменной
почки	0,974	13,62	0,953	8,33
печень	0,977	14,38	0,980	12,96
сердце	0,801	4,23	0,857	4,40
новые перья	0,947	9,28	0,989	17,98
старые перья после эксперимента	0,911	7,0	0,767	3,17
экскременты	0,850	9,94	0,823	7,68

Примечание – В таблице представлены достоверные коэффициенты корреляции при $t_{st} > t_{табл.}$ и $p \leq 0,05$. Значение $t_{табл.}$ (11) = 2,2 при $p \leq 0,05$ для свинца в пробах органов и тканей; $t_{табл.}$ (39) = 1,96 при $p \leq 0,05$ для проб экскрементов; $t_{табл.}$ (8) = 2,3 при $p \leq 0,05$ для кадмия в пробах органов и тканей, $t_{табл.}$ (29) = 2,0 при $p \leq 0,05$ для проб экскрементов.

Данные таблицы 4 и 5 в комплексе характеризуют более высокий уровень зависимости накопления кадмия в организме птиц от величины его поступления с кормом по сравнению со свинцом, что, возможно, связано с менее эффективными барьерными механизмами организма вследствие более высокой токсичности кадмия.

В целом, сравнительная оценка накопления свинца и кадмия в тканях и органах экспериментальных птиц выявила более высокие уровни накопления кадмия в организме птиц по сравнению со свинцом, менее интенсивное его удаление из организма, а также более высокий уровень зависимости накопления кадмия в организме птиц от величины его поступления с кормом по сравнению со свинцом.

Литература

1. Кирьякулов, В.М. Последствия загрязнения свинцом и другими поллютантами среды обитания водоплавающей дичи : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.16 ; 06.02.03 / В.М. Кирьякулов. – ФГОУ ВПО «Рос. гос. аграр. заоч. ун-т». – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.dissercat.com>. – Дата доступа : 27.01.2012 г.
2. Лебедева, Н.В. Экоотоксикология и биогеохимия географических популяций птиц / Н.В. Лебедева. – М. : Наука, 1999. – 199 с.
3. Сергеев, А.А. Тяжелые металлы в охотничьих птицах Кировской области (биологические, индикационные и санитарно-гигиенические аспекты) : дис. ... канд. биол. наук : 06.02.03 / А.А. Сергеев, Всероссийский Научно-исследовательский институт охотоведения и звероводства. – Киров, 2003. – 183 л.
4. Arsenic, cadmium, copper, lead, and selenium in migrating blue-winged teal (*Anas discors* L.) / A. Fedynich [et al.] [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ckwri.tamuc.edu/fileadrim/user_upload/docs/misc. – Дата доступа : 16.04.2011.
5. Concentration of cadmium in the liver and kidneys of some wild and farm animals / М. Kramorova [et al.] [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://piwet.pulawy.pl/doc/biuletyn>. – Дата доступа : 14.04.2011.
6. Concentrations of metals in blood and feathers of nestling ospreys (*Pandion haliaetus*) in Chesapeake and Delaware Bays / В.А. Ratter [et al.] // Arch. Environ. Contam. and Toxicol. – 2008. – № 1. – P. 114–122.
7. Heavy-metal concentrations in female laying great tits (*Parus major*) and their clutches / Т. Dauwe [et al.] // Arch. Environ. Contam. and Toxicol. – 2005. – Vol. 49, № 2. – P. 249–256.

8. Kaimal, B. Laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry as a technique to quantify trace metals in bird feathers / B. Kaimal, R.E. Hannigan, C.B. Dowling // ICP Inf. Newslett.– 2007. – № 8. – P. 839.

9. Вторичная диссоциация комплексов. Константа диссоциации. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://chem.-astu.ru/chair/study/genchem/r5_4.htm. – Дата доступа : 25.04.2011.

Белорусский торгово-экономический
университет потребительской кооперации

Поступила в редакцию 07.06.2013

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф.СКОРИНЫ