



Королев В.А., Бабкина Л.А., Фелькер Е.В., Усачев М.А., Чертова Р.Ю.,
Артемова И.А., Магомедова Д.Р., Рыжаев В.А.

Особенности распределения кадмия в организме в условиях субхронической интоксикации

ФГБОУ ВО «Курский государственный медицинский университет» Минздрава России, 305041, Курск, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. Кадмий (Cd) относится к приоритетным экополлютантам, поступление его в организм животных в количествах, недостаточных для гибели или острых последствий, может сопровождаться избирательным накоплением в различных органах и тканях и приводить к негативным эффектам.

Материалы и методы. Для эксперимента использовали половозрелых самцов крыс линии Wistar. Экспериментальные группы 28 дней получали с питьевой водой дигидрат ацетата кадмия в дозе 1/50 LD₅₀, затем в течение 28 дней — обычную питьевую воду. Контрольные группы получали обычную питьевую воду. Содержание кадмия в 19 биологических средах определяли атомно-адсорбционным методом («КВАНТ-2АТ», Россия) на 7-й, 14-й, 21-й, 28-й и 56-й дни.

Результаты. Повышенный уровень кадмия по сравнению с контролем в условиях субхронической интоксикации наблюдается на 7-й день во всех исследуемых биологических средах за исключением тканей десны и головного мозга. Максимальное накопление кадмия отмечается в печени, тонком кишечнике, почках и плазме; после прекращения поступления в организм уровень Cd восстанавливается до контрольных значений в подчелюстных слюнных железах, головном мозге и лёгких.

Ограничения исследования. Для эксперимента были использованы лабораторные животные только одной линии Wistar. Токсикант вводили перорально в виде дигидрата ацетата кадмия одной концентрации.

Заключение. Сродство кадмия к различным биологическим средам характеризуется значительной вариабельностью в течение всего периода интоксикации. Печень, тонкий кишечник, почки и плазма выступают аккумуляторами Cd. Наиболее вероятным индикатором интоксикации кадмием организма животного служит концентрация этого элемента в тканях печени и почках.

Ключевые слова: кадмий; субхроническая интоксикация; аккумуляция металла; биологические среды

Соблюдение этических стандартов. Исследование одобрено региональным этическим комитетом Курского государственного медицинского университета (протокол № 3 от 17 октября 2022 г.), выполнено согласно этическим принципам работы с животными в научных целях Directive 2010/63/EU of the European Parliament and of the Council on the protection of animals used for scientific purposes и национальным стандартам. Настоящее исследование не содержит результатов исследований с участием людей в качестве объектов исследования.

Для цитирования: Королев В.А., Бабкина Л.А., Фелькер Е.В., Усачев М.А., Чертова Р.Ю., Артемова И.А., Магомедова Д.Р., Рыжаев В.А. Особенности распределения кадмия в организме в условиях субхронической интоксикации. *Гигиена и санитария*. 2026; 105(3): 308–313. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-3-308-313>
<https://elibrary.ru/ndhwzy>

Для корреспонденции: Бабкина Людмила Александровна, e-mail: L-Babkina@yandex.ru

Вклад авторов: Королев В.А. — концепция и дизайн исследования, редактирование; Бабкина Л.А. — концепция и дизайн исследования, поиск информации, статистическая обработка и анализ результатов исследования, написание текста; Фелькер Е.В. — концепция и дизайн исследования, анализ результатов; Усачев М.А. — проведение эксперимента, анализ проб и обработка данных; Чертова Р.Ю. — поиск информации, проведение эксперимента, обработка данных; Артемова И.А. — проведение эксперимента, анализ проб; Магомедова Д.Р., Рыжаев В.А. — проведение эксперимента, сбор данных. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Работа выполнена за счёт средств Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Курский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации.

Поступила: 20.06.2025 / Принята к печати: 15.10.2025 / Опубликовано: 17.04.2026

Vladimir A. Korolev, Lyudmila A. Babkina, Elena V. Felker, Maxim A. Usachev, Regina Y. Chertova,
Irina A. Artemova, Diana R. Magomedova, Vadim A. Ryzhaev

Features of cadmium distribution in the body under conditions of subchronic intoxication

Kursk State Medical University, Kursk, 305041, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Cadmium is one among the priority ecopollutants. The absence of a lethal or immediate impact on animals does not preclude the possibility of cadmium accumulating in specific organs and tissues, resulting in adverse consequences.

Materials and methods. Male mature Wistar rats were used for the experiment. The experimental groups received a dose of cadmium acetate dihydrate equivalent to 1/50 of the LD₅₀, dissolved in drinking water, for 28 days, followed by 28 days on regular drinking water. The control groups consumed regular drinking water. The cadmium content was measured using the atomic adsorption method (KVANT-2AT, Russia) on days 7, 14, 21, 28, and 56 in 19 biological media.

Results. Elevated cadmium levels were observed in all studied biological media on day 7 under conditions of subchronic intoxication, except for gum and brain tissues. The highest levels of cadmium are found in the liver, small intestine, kidneys, and plasma. After the cessation of cadmium intake, the metal level is restored to the control values in the submandibular salivary glands, brain and lungs.

Limitations. Only one Wistar line was used for the laboratory experiment. The toxicant was administered orally in the form of cadmium acetate dihydrate of the same concentration.

Conclusion. The affinity of cadmium to various biological media is characterized by significant variability in the entire period of intoxication. The liver, small intestine, kidneys, and plasma act as metal accumulators. The concentration of cadmium in the liver and kidney tissues in the animal is the most likely indicator of the cadmium poisoning.

Keywords: cadmium; subchronic intoxication; metal accumulation; biological environments

Compliance with ethical standards. The study was approved by the Regional Ethics Committee of Kursk State Medical University (protocol No. 3 of October 17, 2022), carried out in accordance with the ethical principles of working with animals for scientific purposes governed by «Directive 2010/63/EU of the European Parliament and of the Council on the protection of animals used for scientific purposes» and national standards. This article does not contain results from studies involving human subjects.

For citation: Korolev V.A., Babkina L.A., Felker E.V., Usachev M.A., Chertova R.Y., Artemova I.A., Magomedova D.R., Ryzhaev V.A. Features of cadmium distribution in the body under conditions of subchronic intoxication. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2026; 105(3) : 308–313. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-3-308-313> <https://elibrary.ru/ndhwy> (In Russ.)

For correspondence: Lyudmila A. Babkina, e-mail: L-Babkina@yandex.ru

Contribution: Korolev V.A. — the concept and design of the study, editing; Babkina L.A. — the concept and design of the study, information search, statistical processing and analysis of research results, writing text; Felker E.V. — the concept and design of the study, analysis of the results; Usachev M.A. — conducting an experiment, analyzing samples, and processing data; Chertova R.Y. — information search, experiment, data processing; Artemova I.A. — conducting an experiment, analyzing samples; Magomedova D.R., Ryzhaev V.A. — conducting an experiment, collecting data. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The work was carried out at the expense of Kursk State Medical University.

Received: June 20, 2025 / Accepted: October 15, 2025 / Published: April 17, 2026

Введение

Биогеохимическое преобразование окружающей среды в результате деятельности человека приводит к накоплению тяжёлых металлов в почве, атмосферном воздухе, воде, растениях [1–3]. Кадмий является одним из приоритетных экополлютантов. Основные пути поступления кадмия в организм человека связаны с миграцией по цепям питания, из атмосферного воздуха при дыхании, в процессе курения [1, 4]. Далее в организме кадмий перераспределяется по различным органам с последующей детоксикацией и аккумуляцией [1, 5]. Длительный биологический период полураспада в сочетании с высокой токсичностью, отсутствием физиологических механизмов выведения может создавать риски для здоровья населения [6].

Негативное воздействие кадмия затрагивает практически все органы и системы человека [1, 7, 8], а особенности накопления зависят от вида, пола, возраста и состояния организма [9]. Дефицит или избыток элементов в составе пищи может приводить к усилению всасывания кадмия [10]. Эффекты кадмия в организме определяются способом поступления, дозой и продолжительностью воздействия [11]. Высокие дозы приводят к апоптозу клеток, а субхронические и хронические активируют адаптивные механизмы к внешней среде [6, 12]. Распределение Cd по органам варьирует в зависимости от дозы и соединения, поступающего в организм [10]. Аккумуляция в биологических средах зависит от наличия эффективных механизмов клеточного транспорта и лигандов (тиоловые группы, металлотионеины, альбумины и др.) [10]. В исследованиях рассматривается действие Cd на основные органы-мишени модельных животных — печень и почки [13]. При этом недостаточно сведений об особенностях динамики накопления кадмия в течение периода интоксикации в органах-мишенях, а также других биологических средах. В качестве токсиканта преимущественно используется хлорид кадмия [13]. Пероральное введение Cd отражает естественный путь поступления его как экополлютанта в организм человека и учитывает особенности всасывания различными органами.

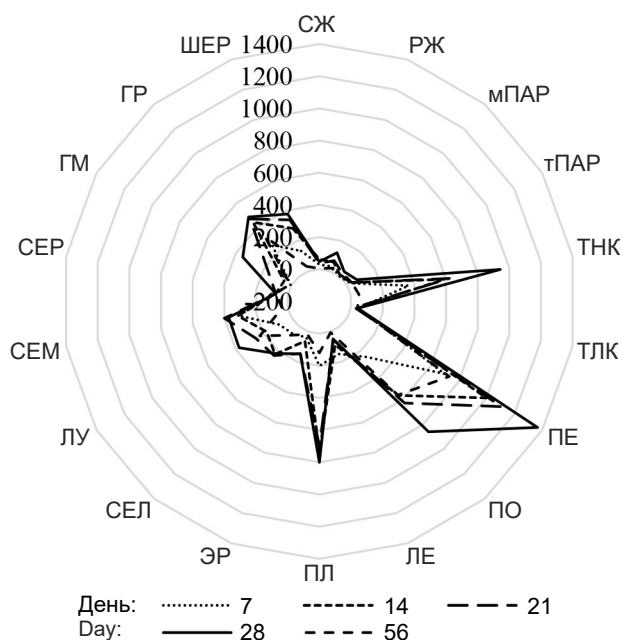
Изучение динамики распределения кадмия в организме модельных животных при субхронической интоксикации позволит выявить наиболее уязвимые органы и системы с целью разработки оптимальных стратегий профилактики для снижения риска развития неблагоприятных последствий для здоровья, а также поможет разработке новых подходов к мониторингу и контролю содержания этого элемента в биологических объектах.

Цель исследования — изучение динамики содержания кадмия в различных органах модельных животных при субхроническом пероральном поступлении.

Материалы и методы

Эксперимент проводили на базе экспериментально-биологической клиники при ФГБОУ ВО КГМУ Минздрава России. Использовали восьминедельных крыс-самцов линии Wistar массой тела 220–230 г. Животных содержали в индивидуальных клетках в стандартных условиях. Доступ к корму и к питьевой воде не был ограничен. Экспериментальные крысы в течение 28 дней получали в составе с питьевой водой дигидрат ацетата кадмия (кадмий уксуснокислый двухводный, ч.д.а., 99,5%, CAS-номер 5743-04-4, Россия) в дозе 1/50 LD₅₀ (LD₅₀ = 360 мг/кг). В последующие 28 дней животных переводили на обычную питьевую воду. Группы контрольных крыс получали обычную питьевую воду в течение всего периода исследования. Каждая группа животных состояла из 10 особей. Концентрация кадмия в обычной питьевой воде и корме была ниже предела обнаружения. Животных выводили из эксперимента на 7-й, 14-й, 21-й, 28-й и 56-й дни путём эвтаназии эфирным наркозом.

Распределение кадмия анализировали в ротовой жидкости, подчелюстных слюнных железах, тканях десны, твёрдых тканях пародонта, тонком и толстом кишечнике, печени, плазме, эритроцитарной массе, подчелюстных лимфатических узлах, селезёнке, лёгких, почках, семенниках, сердце, грудине, головном мозге, шерсти. Нестимулированную ротовую жидкость (V = 50 мкл) собирали у живых крыс дозатором пипеточным JoanLab (ДПАОП-1-10-100 JoanLab, «Ленпипет Thermo Scientific», Россия), центрифугировали 20 мин при 1500 об./мин (ротатор F-45-12-11; MiniSpin, Германия). Забор крови производили из правого желудочка сердца, центрифугировали 15 мин (3000 об./мин, ротатор F-45-12-11; MiniSpin, Германия) при температуре плюс 4 °C для получения плазмы и эритроцитарной массы. Сбор шерсти осуществляли с участка спины животного ниже проекции лопаток (S = 1 см²) медицинскими ножницами с последующим обезжириванием ацетоном. Органы извлекали, промывали физиологическим раствором и использовали для приготовления гомогенатов. Содержание кадмия в образцах определяли в предварительно полученном минерализате атомно-адсорбционным методом («КВАНТ-2АТ», Россия) в режиме абсорбции с помощью спектральных ламп ЛТ-6М (λ = 228,8 нм), выражали в мкг/мл или мкг/г. Атомизацию осуществляли в пламени «ацетилен — воздух».



Динамика содержания кадмия в организме экспериментальных животных (прирост в % относительно контроля): ПЕ – печень, ТЛК – толстый кишечник, ТНК – тонкий кишечник, тПАР – твёрдые ткани пародонта, мПАР – ткани десны, РЖ – ротовая жидкость, СЖ – подчелюстные слюнные железы, ШЕР – шерсть, ГР – грудина, ГМ – головной мозг, СЕР – сердце, СЕМ – семенники, ЛУ – подчелюстные лимфатические узлы, СЕЛ – селезёнка, ЭР – эритроцитарная масса, ПЛ – плазма, ЛЕ – лёгкие, ПО – почки.

Trend in cadmium content in biological media (in % relative to control): ПЕ – liver, ТЛК – large intestine, ТНК – small intestine, тПАР – hard periodontal tissues, мПАР – gingival tissues, РЖ – oral fluid, СЖ – submandibular salivary glands, ШЕР – wool, ГР – sternum, ГМ – brain, СЕР – heart, СЕМ – testicles, ЛУ – submandibular lymph nodes, СЕЛ – spleen, ЭР – erythrocyte mass, ПЛ – plasma, ЛЕ – lungs, ПО – kidneys.

Статистическую обработку результатов проводили с помощью программы Statistica 13.0 (StatSoft, США). Для определения типа распределения содержания кадмия в органах применяли критерий Шапиро – Уилка, для сравнения независимых выборок – критерий Манна – Уитни. Статистическая значимость определена при $p < 0,05$.

Результаты

Содержание кадмия в биологических средах представлено в **таблице**. Концентрация Cd в различных тканях и органах контрольных животных незначительна и варьирует: наибольшее количество содержится в почках (0,459–0,486 мкг/г), тканях толстого кишечника (0,37–0,395 мкг/г) и эритроцитарной массе (0,326–0,366 мкг/мл), наименьшее – в сердце (0,042–0,045 мкг/г), плазме (0,051–0,06 мкг/мл), подчелюстных лимфатических узлах (0,076–0,08 мкг/г).

Поступление кадмия в дозе $1/50 LD_{50}$ с питьевой водой приводит к увеличению его содержания по сравнению с контролем во всех исследуемых биологических средах. При этом отмечается специфичность в динамике накопления Cd в разных тканях и органах. Повышенное содержание через 7 дней интоксикации отмечается во всех исследуемых образцах тканей и органах ($p < 0,05$) за исключением тканей десны ($p = 0,9097$) и головного мозга ($p = 0,3075$). Значительно возрастает содержание Cd в печени (в 8,1 раза), тканях тонкого кишечника (в 4,64 раза), семенниках (в 4,11 раза), грудине (в 3,58 раза), почках (в 3,5 раза), плазме (в 3 раза), лёгких (в 2,48 раза) и шерсти (в 2,33 раза). Через 14 дней интоксикации превышение концентрации кадмия по сравне-

нию с контролем регистрируется во всех исследуемых биологических средах, при этом в большей степени – в печени (11,11 раза), плазме (7,55 раза), стенке тонкого кишечника (6,55 раза), почках (6,64 раза). В лёгких наблюдается снижение количества кадмия по сравнению с 7-м днём и превышение показателя контроля в 1,81 раза. На 21-й день интоксикации максимальное увеличение отмечается в печени (11,82 раза), плазме (7,92 раза), почках (7,3 раза) и стенке тонкого кишечника (7,17 раза). На 28-й день интоксикации аккумуляторами кадмия в наибольшей степени также являются печень, тонкий кишечник, почки и плазма, при этом отмечается перераспределение показателей прироста: в 14,27 раза увеличивается содержание в печени, в 10,27 раза – в тонком кишечнике, в 9,64 раза – в почках и в 8,41 раза – в плазме.

На основе анализа динамики содержания кадмия при субхронической интоксикации можно выделить группы тканей и органов по специфичности накопления элемента (см. **рисунок**).

В большинстве тканей и органов наблюдается непрерывное увеличение содержания кадмия в течение всего эксперимента с максимумом на 28-й день интоксикации: печень (на 1367%), тонкий кишечник (на 943%), почки (на 857%), плазма (на 800%), подчелюстные лимфатические узлы (на 376%), головной мозг (на 350%), ротовая жидкость (на 122,2%), твёрдые ткани пародонта (на 69,23%), ткани десны (на 41,41%). Для тканей толстого кишечника и сердца на протяжении 28 дней интоксикации характерна незначительная вариабельность повышенного содержания кадмия: на 24,32–45,95% для толстого кишечника, на 75–86,5% для сердца. В лёгких максимальное увеличение концентрации кадмия регистрируется на 7-й день интоксикации (на 148%), в дальнейшем происходит снижение, на 28-й день прирост составляет 47,62%. В подчелюстных слюнных железах наиболее значимое увеличение содержания кадмия отмечается на 14-й день интоксикации (на 61,9%). В тканях селезёнки и грудине максимальное увеличение выявлено с 14-го по 28-й дни интоксикации: на 222–239% в селезёнке и на 442–485% в грудине. Максимальный прирост содержания Cd на 21-й день с сохранением высокого уровня до окончания интоксикации наблюдали в эритроцитах (на 145–147%), семенниках (на 373–400%) и шерсти (на 339–378%) крыс.

На основе анализа процентного изменения содержания кадмия в биологических средах по отношению к контролю можно выделить следующие группы органов и тканей: 1) с выраженным накоплением (более чем на 500%) – печень, тонкий кишечник, почки и плазма; 2) со средним уровнем накопления (более чем на 300%) – грудина, головной мозг, семенники, подчелюстные лимфатические узлы, шерсть; 3) с незначительным накоплением (менее 300%) – ротовая жидкость, подчелюстные слюнные железы, ткани десны, толстый кишечник, эритроциты, селезёнка, сердце, лёгкие.

После прекращения поступления кадмия его количество снижается до уровня, не отличающегося от контрольных животных, в подчелюстных слюнных железах ($p = 0,4274$), головном мозге ($p = 0,1041$), лёгких ($p = 0,1405$). В стенке толстого кишечника и сердце по истечении восстановительного периода содержание кадмия сохраняется на уровне 28-го дня интоксикации ($p = 0,162$ и $p = 0,7338$ соответственно). В остальных исследуемых биосредах после прекращения дополнительной нагрузки кадмием его количество снижается, но не достигает тех же значений, что и у животных контрольной группы.

Обсуждение

Длительное поступление небольших доз кадмия с питьевой водой сопровождается его избирательным накоплением в различных органах и тканях животных [14]. Вариабельность накопления кадмия биологическими субстратами может быть обусловлена особенностями их анатомического строения, физиологических процессов, механизмов транс-

Динамика накопления кадмия (мкг/г или мкг/мл) в биологических средах в условиях субхронической интоксикации кадмием Trend in cadmium accumulation (µg/g or µg/ml) Kursk, in biological media under conditions of subchronic cadmium intoxication

Биологическая среда Biological environment	Группы сравнения Comparison groups	Продолжительность эксперимента, дней / Duration of the experiment, days				
		7	14	21	28	56
Ротовая жидкость Oral fluid	Контроль / Control	0.100 [0.095–0.105]	0.095 [0.092–0.104]	0.097 [0.088–0.107]	0.093 [0.086–0.097]	0.097 [0.093–0.103]
	Cd	0.127 [0.120–0.130]*	0.161 [0.151–0.165]*	0.170 [0.167–0.174]*	0.205 [0.198–0.210]*	0.125 [0.118–0.129]*#
Подчелюстные слюнные железы Submandibular salivary glands	Контроль / Control	0.211 [0.199–0.225]	0.215 [0.202–0.234]	0.213 [0.195–0.245]	0.210 [0.191–0.247]	0.212 [0.196–0.254]
	Cd	0.274 [0.248–0.333]*	0.337 [0.273–0.355]*	0.292 [0.257–0.359]*	0.314 [0.270–0.372]*	0.217 [0.200–0.229]*#
Ткани десны / Gingival tissues	Контроль / Control	0.130 [0.124–0.136]	0.131 [0.125–0.135]	0.130 [0.123–0.139]	0.128 [0.122–0.132]	0.129 [0.123–0.136]
	Cd	0.129 [0.122–0.137]	0.138 [0.134–0.157]*	0.164 [0.149–0.176]*	0.181 [0.169–0.192]*	0.143 [0.129–0.149]*#
Твёрдые ткани пародонта Hard periodontal tissues	Контроль / Control	0.125 [0.119–0.128]	0.123 [0.118–0.134]	0.124 [0.118–0.131]	0.126 [0.116–0.132]	0.124 [0.120–0.133]
	Cd	0.146 [0.140–0.154]*	0.159 [0.153–0.170]*	0.163 [0.159–0.178]*	0.221 [0.209–0.230]*	0.160 [0.146–0.177]*#
Тонкий кишечник Small intestine	Контроль / Control	0.141 [0.133–0.150]	0.137 [0.124–0.144]	0.141 [0.130–0.147]	0.142 [0.135–0.148]	0.141 [0.133–0.146]
	Cd	0.651 [0.581–0.790]*	0.897 [0.726–0.934]*	1.011 [0.782–1.081]*	1.458 [1.253–1.726]*	0.210 [0.174–0.227]*#
Толстый кишечник Large intestine	Контроль / Control	0.371 [0.346–0.423]	0.395 [0.381–0.417]	0.370 [0.347–0.423]	0.372 [0.356–0.390]	0.393 [0.332–0.439]
	Cd	0.539 [0.487–0.655]*	0.526 [0.426–0.555]*	0.455 [0.404–0.559]*	0.534 [0.421–0.571]*	0.550 [0.457–0.594]*
Печень Liver	Контроль / Control	0.149 [0.136–0.171]	0.149 [0.137–0.173]	0.153 [0.139–0.183]	0.154 [0.137–0.181]	0.148 [0.137–0.171]
	Cd	1.204 [1.038–1.461]*	1.655 [1.304–1.931]*	1.808 [1.500–2.098]*	2.198 [1.828–2.688]*	1.249 [0.228–1.800]*#
Плазма Plasma	Контроль / Control	0.051 [0.044–0.063]	0.056 [0.047–0.062]	0.060 [0.049–0.064]	0.054 [0.047–0.058]	0.051 [0.047–0.061]
	Cd	0.154 [0.131–0.176]*	0.423 [0.343–0.447]*	0.475 [0.367–0.512]*	0.454 [0.399–0.537]*	0.111 [0.093–0.121]*#
Эритроцитарная масса Erythrocyte mass	Контроль / Control	0.343 [0.309–0.383]	0.352 [0.307–0.361]	0.326 [0.306–0.353]	0.366 [0.316–0.386]	0.332 [0.283–0.397]
	Cd	0.469 [0.381–0.514]*	0.569 [0.461–0.615]*	0.811 [0.627–0.874]*	0.891 [0.766–1.054]*	0.393 [0.383–0.438]*#
Подчелюстные лимфатические узлы Submandibular lymph nodes	Контроль / Control	0.076 [0.069–0.085]	0.080 [0.069–0.087]	0.077 [0.069–0.085]	0.079 [0.070–0.090]	0.076 [0.064–0.085]
	Cd	0.143 [0.116–0.156]*	0.223 [0.199–0.229]*	0.275 [0.232–0.321]*	0.376 [0.318–0.420]*	0.249 [0.236–0.267]*#
Селезёнка Spleen	Контроль / Control	0.233 [0.207–0.248]	0.234 [0.216–0.247]	0.234 [0.206–0.250]	0.231 [0.215–0.253]	0.235 [0.199–0.262]
	Cd	0.371 [0.331–0.451]*	0.787 [0.637–0.830]*	0.782 [0.604–0.842]*	0.737 [0.636–0.872]*	0.401 [0.366–0.480]*#
Почки Kidneys	Контроль / Control	0.459 [0.436–0.514]	0.468 [0.414–0.512]	0.476 [0.449–0.510]	0.486 [0.463–0.501]	0.478 [0.418–0.552]
	Cd	1.613 [1.310–1.768]*	3.108 [2.515–3.278]*	3.475 [2.995–4.141]*	4.686 [3.694–4.973]*	3.168 [2.892–3.791]*#
Лёгкие Lungs	Контроль / Control	0.211 [0.192–0.216]	0.225 [0.198–0.231]	0.216 [0.198–0.230]	0.215 [0.203–0.229]	0.216 [0.183–0.242]
	Cd	0.521 [0.423–0.568]*	0.408 [0.332–0.441]*	0.344 [0.330–0.362]*	0.306 [0.294–0.344]*	0.228 [0.211–0.251]*#
Сердце Heart	Контроль / Control	0.043 [0.040–0.047]	0.043 [0.034–0.046]	0.045 [0.042–0.048]	0.042 [0.039–0.047]	0.044 [0.037–0.049]
	Cd	0.080 [0.065–0.088]*	0.075 [0.064–0.081]*	0.068 [0.060–0.083]*	0.073 [0.062–0.086]*	0.076 [0.063–0.083]*
Головной мозг Brain	Контроль / Control	0.147 [0.126–0.155]	0.145 [0.127–0.156]	0.145 [0.134–0.168]	0.141 [0.124–0.168]	0.147 [0.125–0.160]
	Cd	0.151 [0.135–0.184]	0.233 [0.188–0.246]*	0.396 [0.341–0.471]*	0.633 [0.547–0.749]*	0.166 [0.138–0.179]*#
Грудина Breastbone	Контроль / Control	0.120 [0.106–0.128]	0.126 [0.112–0.131]	0.127 [0.125–0.136]	0.125 [0.118–0.133]	0.123 [0.104–0.138]
	Cd	0.428 [0.382–0.520]*	0.655 [0.530–0.672]*	0.741 [0.573–0.798]*	0.758 [0.665–0.895]*	0.510 [0.426–0.549]*#
Семенники Testicles	Контроль / Control	0.182 [0.173–0.217]	0.202 [0.182–0.232]	0.186 [0.176–0.219]	0.216 [0.201–0.246]	0.220 [0.175–0.229]
	Cd	0.735 [0.597–0.806]*	0.826 [0.672–0.893]*	0.952 [0.736–1.025]*	1.040 [0.820–1.114]*	0.298 [0.252–0.333]*#
Шерсть Wool	Контроль / Control	0.182 [0.169–0.205]	0.184 [0.179–0.208]	0.179 [0.167–0.188]	0.181 [0.170–0.201]	0.187 [0.164–0.221]
	Cd	0.418 [0.354–0.454]*	0.690 [0.560–0.756]*	0.794 [0.646–0.859]*	0.861 [0.728–1.007]*	0.252 [0.244–0.261]*#

Примечание. Результаты представлены в виде медианы и значений нижнего и верхнего квартилей ($Me [Q_1–Q_3]$). Статистически значимые отличия: * – по сравнению с контролем; # – по сравнению с 28-м днём группы Cd ($p < 0.05$).

Note. The results are presented as the median and values of the lower and upper quartiles ($Me [Q_1–Q_3]$). Statistically significant differences: * – compared to the control; # – compared to the 28th day of the Cd group ($p < 0.05$).

порта элементов и поддержания гомеостаза, процессов биотрансформации ксенобиотиков [15].

При пероральном поступлении кадмий всасывается преимущественно в двенадцатиперстной кишке и проксимальном отделе тощей кишки [16]. Наибольшая концентрация в энтероцитах всех типов клеточных транспортёров (ABC-транспортёров, ZIP, DMT1, TRP-переносчиков) [16], участвующих в переносе кадмия, может объяснять значительное накопление его в стенке тонкого кишечника в течение всего периода интоксикации и снижение количества практически до уровня контрольных животных после прекращения поступления извне. Кадмий легко образует комплексы с тиолсодержащими биомолекулами и в виде конъюгата этих лигандов также поглощается энтероцитами. Более выраженное увеличение содержания кадмия на 7-й день интоксикации в стенке тонкого кишечника крыс по сравнению с плазмой и почками может быть обусловлено дозозависимостью всасывания: при низких дозах большая часть локализуется в эпителии кишечника, а по мере увеличения поступления снижается способность клеток удерживать Cd, и большая его часть проникает через эпителиальную мембрану и усваивается другими органами [17]. Хорошая регенерационная способность эпителиоцитов, возможно, объясняет более выраженную способность энтероцитов восстанавливать гомеостаз кадмия по сравнению с другими органами-мишенями.

Высокое содержание кадмия в плазме в течение всего периода интоксикации может быть обусловлено выводом его из энтероцитов в портальную кровь посредством базолатеральных белков ABC-транспортёров в виде комплексов с различными лигандами (металлотионеином, бета-2-микроглобулином, альбумином, иммуноглобулином G, липокаллином-2, глутатионом) [15]. Остаточный кадмий в плазме способен поглощаться эритроцитами [15, 17], что, возможно, объясняет его более высокое содержание в клетках крови по сравнению с плазмой как у контрольных, так и у экспериментальных животных, а также более выраженный прирост лишь на 21-й день интоксикации.

Металлотионеинам принадлежит существенная роль в распределении кадмия в отдельных тканях и органах посредством кровообращения [13, 19]. Активно поглощаясь гепатоцитами через систему клеточных транспортёров в виде конъюгатов с биомолекулами, Cd индуцирует синтез металлотионеинов и в связанном виде аккумулируется в печени [16]. Способность комплекса «кадмий – металлотионеин» к фильтрации в почечных клубочках и реабсорбции в клетках проксимальных канальцев приводит к стимулированию синтеза металлотионеинов почками и соответственно к повышению концентрации кадмия [19]. Печень и почки являются основными мишенями и аккумуляторами кадмия при его поступлении с питьевой водой и пищей [17, 20]. Таким образом, значительное накопление Cd в печени и почках в течение всего периода интоксикации и медленное снижение содержания после прекращения поступления может быть обусловлено индукцией синтеза металлотионеинов с последующим комплексообразованием Cd-МТ [18]. Более выраженное увеличение количества кадмия в печени по сравнению с почками указывает на хроническое воздействие низких уровней

элемента, тогда как обратное соотношение свидетельствует об остром влиянии высоких доз [14, 17].

Длительное пероральное воздействие кадмия подавляет всасывание кальция в кишечнике и способствует дегенерации костной ткани [6, 17]. Замещение кадмием кальция в костной ткани, возможно, объясняет превышение в пять раз содержания в грудине экспериментальных крыс Cd по сравнению с контролем с 14-го дня интоксикации и незначительное его снижение после прекращения поступления металла. Однако в твёрдых тканях пародонта наблюдается менее выраженное накопление Cd, что может быть связано с более развитыми системами элиминации.

Критическим органом при хронической интоксикации кадмием у самцов могут выступать семенники [1, 16, 17, 21, 22]. Поступление кадмия в клетки семенников связывают с имитацией цинка в клеточных транспортёрах и образованием тиоловых конъюгатов [16]. Максимальное накопление уже через 21-й день интоксикации с последующим сохранением высокого уровня в последующие дни, возможно, обусловлено насыщением цинковых транспортёров [16].

Эффекты иммуномодуляции или иммуносупрессии кадмием могут быть обусловлены способностью кадмия накапливаться в клетках лимфатических узлов [23].

Токсическое действие кадмия в различных органах и тканях обусловлено их аккумулирующей способностью по отношению к кадмию, интенсивностью обменных процессов и наличием системы переносчиков, обеспечивающих поступление Cd в клетки и перераспределение его в организме.

Заключение

Длительное воздействие на организм потенциально токсичных веществ в количествах, недостаточных для гибели или острых последствий, может приводить к негативным эффектам. Сродство кадмия к различным биологическим средам характеризуется значительной вариабельностью в течение всего периода интоксикации. Для большинства тканей и органов содержание кадмия при дополнительной нагрузке возрастает в течение всего периода интоксикации, при этом печень, тонкий кишечник, почки и плазма выступают в качестве аккумуляторов. В лёгких и слюнных железах максимальное увеличение содержания кадмия отмечается в начальные периоды интоксикации, затем наблюдается снижение. В тканях толстого кишечника и сердца концентрация Cd сохраняется практически на одном уровне в течение периода поступления извне. Прекращение поступления приводит к восстановлению уровня Cd до контрольных значений в подчелюстных слюнных железах, головном мозге и лёгких, сохранению на уровне последнего дня интоксикации в стенке толстого кишечника и сердце, снижению без достижения значений контроля во всех остальных биологических средах.

Наиболее вероятным индикатором интоксикации кадмием организма животного служит концентрация в тканях печени, а в качестве дополнительного информационного показателя, отражающего уровень воздействия, – содержание в почках и соотношение количества металла в печени и почках.

Литература

(п.п. 1, 4–12, 14–20, 22, 23 см. References)

- Бабкина Л.А., Лукьянчиков Д.С., Лукьянчикова О.В. Особенности аккумуляции тяжелых металлов листьями подорожника большого (*Plantago major* L.) в условиях урбанизированных территорий. *Самарский научный вестник*. 2018; 7(1): 19–24. <https://elibrary.ru/yrhzy>
- Неведров Н.П. Профильное распределение и запасы тяжелых металлов в почвах разного генезиса на территории городов западной части Центрально-Черноземного региона. *Агрофизика*. 2024; (4): 9–15. <https://doi.org/10.25695/agrph.2024.04.02> <https://elibrary.ru/kqykbr>
- Гизатуллина А.А., Валова Я.В., Смолянкин Д.А., Хуснутдинова Н.Ю., Каримов Д.О., Каримов Д.Д. и др. Влияние хронического поступления хлорида кадмия на транскрипционную активность генов металлотионеинов и переносчиков цинка. *Гигиена и санитария*. 2024; 103(2): 158–64. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-2-158-164> <https://elibrary.ru/qtnvci>
- Усманова Э.Н., Каримов Д.О., Даукаев Р.А., Хуснутдинова Н.Ю., Афонькина С.Р., Мусабиров Д.Э. и др. Особенности накопления кадмия в гонадах разнополых лабораторных животных. *Гигиена и санитария*. 2024; 103(5): 483–88. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-5-483-488> <https://elibrary.ru/qdnqjt>

References

- Davidova S., Milushev V., Satchanska G. The mechanisms of cadmium toxicity in living organisms. *Toxics*. 2024; 12(12): 875. <https://doi.org/10.3390/toxics12120875>
- Babkina L.A., Lukyanchikov D.S., Lukyanchikova O.V. Peculiarities of heavy metals accumulation by dooryard plantain's leaves (*Plantago major* L.) in the urbanized territories. *Samarskii nauchnyi vestnik*. 2018; 7(1): 19–24. <https://elibrary.ru/yrhzyz> (in Russian)
- Nevedrov N.P. Profile distribution and reserves of heavy metals in soils of different genesis in the cities of the western part of the Central Chernozem region. *Agrofizika*. 2024; (4): 9–15. <https://doi.org/10.25695/agrph.2024.04.02> <https://elibrary.ru/kqykbr> (in Russian)
- Lech T., Sadlik J.K. Cadmium concentration in human autopsy tissues. *Biol. Trace Elem. Res.* 2017; 179(2): 172–7. <https://doi.org/10.1007/s12011-017-0959-5>
- Apiam A., Asagba S.O., Tonukari N.J. Role of Anthocleista vogelii in serum antioxidant defence system in cadmium-induced oxidative stress in Wistar rats. *Beni-Suef Univ. J. Basic Appl. Sci.* 2019; 8(1): 12. <https://doi.org/10.1186/s43088-019-0012-1>
- Charkiewicz A.E., Omeljaniuk W.J., Nowak K., Garley M., Nikliński J. Cadmium toxicity and health effects – a brief summary. *Molecules*. 2023; 28(18): 6620. <https://doi.org/10.3390/molecules28186620>
- Rani A., Kumar A., Lal A., Pant M. Cellular mechanisms of cadmium-induced toxicity: a review. *Int. J. Environ. Health Res.* 2014; 24(4): 378–99. <https://doi.org/10.1080/09603123.2013.835032>
- Flora S.J.S. Metal poisoning: threat and management. *J. Med. Sci.* 2009; 2(2): 4–26.
- Blazka M.E., Nolan C.V., Shaikh Z.A. Developmental and sex differences in cadmium distribution and metallothionein induction and localization. *J. Appl. Toxicol.* 1988; 8(3): 217–22. <https://doi.org/10.1002/jat.2550080310>
- Swiergosz-Kowalewska R. Cadmium distribution and toxicity in tissues of small rodents. *Microsc. Res. Tech.* 2001; 55(3): 208–22. <https://doi.org/10.1002/jemt.1171>
- Neathery M.W., Miller W.J. Metabolism and toxicity of cadmium, mercury, and lead in animals: a review. *J. Dairy Sci.* 1975; 58(12): 1767–81. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(75\)84785-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(75)84785-0)
- Skipper A., Sims J.N., Yedjou C.G., Tchounwou P.B. Cadmium chloride induces DNA damage and apoptosis of human liver carcinoma cells via oxidative stress. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2016; 13(1): 88. <https://doi.org/10.3390/ijerph13010088>
- Gizatullina A.A., Valova Ya.V., Smolyankin D.A., Khusnutdinova N.Yu., Karimov D.O., Karimov D.D., et al. Effect of chronic intake of cadmium chloride on the transcriptional activity of metallothionein and zinc transporter genes. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2024; 103(2): 158–64. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-2-158-164> <https://elibrary.ru/qtnvci> (in Russian)
- Ping Z., Bi Z., Huanping L., An L.Z. Heavy metal concentrations in five tissues of chickens from a mining area. *Pol. J. Environ. Stud.* 2014; 23(6): 2375–9.
- Cygan-Szczegielniak D. The levels of mineral elements and toxic metals in the longissimus lumborum muscle, hair and selected organs of red deer (*Cervus elaphus* L.) in Poland. *Animals*. 2021; 11(5): 1231. <https://doi.org/10.3390/ani11051231>
- Bridges C.C., Zalups R.K. Molecular and ionic mimicry and the transport of toxic metals. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 2005; 204(3): 274–308. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2004.09.007>
- Scheuhammer A.M. The chronic toxicity of aluminium, cadmium, mercury, and lead in birds: a review. *Environ. Pollut.* 1987; 46(4): 263–95. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(87\)90173-4](https://doi.org/10.1016/0269-7491(87)90173-4)
- Nordberg G.F., Nogawa K., Nordberg M., Friberg L.T. Cadmium. In: *Handbook on the Toxicology of Metals*. Academic Press; 2007: 445–86. <https://doi.org/10.1016/b978-012369413-3/50078-1>
- Linšak D.T., Linšak Z., Spirić Z., Srebočan E., Glad M., Cenov A., et al. Influence of cadmium on metallothionein in expression and products of lipid peroxidation in the organs of hares (*Lepus europaeus* Pallas). *J. Appl. Toxicol.* 2014; 34(3): 289–95. <https://doi.org/10.1002/jat.2880>
- Carpen E., Andreani G., Isani G. Trace elements in unconventional animals: a 40-year experience. *J. Trace Elem. Med. Biol.* 2017; 43: 169–179. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2017.02.003>
- Usmanova E.N., Karimov D.O., Daukaev R.A., Khusnutdinova N.Yu., Afonkina S.R., Musabirov D.E., et al. Peculiarities of cadmium accumulation in the gonads in heterosexual laboratory animals. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2024; 103(5): 483–88. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-5-483-488> <https://elibrary.ru/qdnqjt> (in Russian)
- Bhardwaj J.K., Panchal H., Saraf P. Cadmium as a testicular toxicant: a review. *J. Appl. Toxicol.* 2021; 41(1): 105–17. <https://doi.org/10.1002/jat.4055>
- Wang Z., Sun Y., Yao W., Ba Q., Wang H. Effects of cadmium exposure on the immune system and immunoregulation. *Front. Immunol.* 2021; 12: 695484. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.695484>

Сведения об авторах

Королев Владимир Анатольевич, доктор биол. наук, профессор, зав. каф. биологии, медицинской генетики и экологии ФГБОУ ВО КГМУ Минздрава России, 305041, Курск, Россия. E-mail: medecol1@yandex.ru

Бабкина Людмила Александровна, канд. биол. наук, доцент, доцент каф. биологии, медицинской генетики и экологии ФГБОУ ВО КГМУ Минздрава России, 305041, Курск, Россия. E-mail: L-Babkina@yandex.ru

Фелькер Елена Викторовна, канд. мед. наук, доцент, доцент каф. хирургической стоматологии и челюстно-лицевой хирургии ФГБОУ ВО КГМУ Минздрава России, 305041, Курск, Россия. E-mail: felkerv@kursksmu.net

Усачев Максим Антонович, аспирант каф. биологии, медицинской генетики и экологии ФГБОУ ВО КГМУ Минздрава России. E-mail: usachev.maksim@yandex.ru

Чертova Регина Юрьевна, аспирант, ассистент каф. биологии, медицинской генетики и экологии ФГБОУ ВО КГМУ Минздрава России, 305041, Курск, Россия. E-mail: chertovary@kursksmu.net

Артемова Ирина Александровна, ассистент каф. микробиологии, вирусологии, иммунологии ФГБОУ ВО КГМУ Минздрава России, 305041, Курск, Россия. E-mail: artemovaia@kursksmu.net

Магомедова Диана Радимовна, ассистент каф. биологии, медицинской генетики и экологии ФГБОУ ВО КГМУ Минздрава России, 305041, Курск, Россия. E-mail: magomedovadr@kursksmu.net

Рыжаев Вадим Александрович, студент 5-го курса педиатрического факультета ФГБОУ ВО КГМУ Минздрава России, 305041, Курск, Россия. E-mail: ryzhaev.vadim.2016@yandex.ru

About the authors

Vladimir A. Korolev, DSc (Biology) sciences, professor, head, Department of biology, medical genetics, and ecology, Kursk State Medical University, Kursk, 305041, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-4376-4284> E-mail: medecol1@yandex.ru

Lyudmila A. Babkina, PhD (Biology), associate professor, Department of biology, medical genetics, and ecology, Kursk State Medical University, Kursk, 305041, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0009-4789-3372> E-mail: L-Babkina@yandex.ru

Elena V. Felker, PhD (Medicine), associate professor, Department of surgical dentistry and maxillofacial surgery, Kursk State Medical University, Kursk, 305041, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-7948-7290> E-mail: felkerv@kursksmu.net

Maxim A. Usachev, PhD student, Department of biology, medical genetics, and ecology, Kursk State Medical University, Kursk, 305041, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0008-7662-8343> E-mail: usachev.maksim@yandex.ru

Regina Y. Chertova, PhD student, assistant lecturer, Department of biology, medical genetics, and ecology, Kursk State Medical University, Kursk, 305041, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0005-0783-6497> E-mail: chertovary@kursksmu.net

Irina A. Artemova, assistant lecturer, Department of microbiology, virology, and immunology Kursk State Medical University, Kursk, 305041, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0008-9374-5058> E-mail: artemovaia@kursksmu.net

Diana R. Magomedova, assistant lecturer, Department of biology, medical genetics, and ecology, Kursk State Medical University, Kursk, 305041, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0001-2200-8383> E-mail: magomedovadr@kursksmu.net

Vadim A. Ryzhaev, 5th year student, Pediatric Faculty, Kursk State Medical University, Kursk, 305041, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0000-5139-3850> E-mail: ryzhaev.vadim.2016@yandex.ru