

УДК 619:615.9:581.192.6

DOI: 10.30914/2411-9687-2022-8-3-272-279

**ВЛИЯНИЕ ЦИНКА (II), МАГНИЯ (II), СЕЛЕНА (IV), МЕТИОНИНА И АЛЬФАСОРБА
НА ЭМБРИОТОКСИЧЕСКОЕ И ТЕРАТОГЕННОЕ ДЕЙСТВИЕ КАДМИЯ У КРЫС****С. Н. Потапова, И. Р. Кадиков, Д. Р. Сагдеев, И. Ф. Вафин**Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Введение. Кадмий является одним из самых стойких загрязнителей окружающей среды. Длительное токсическое его действие повреждает не только основные органы-накопители, но и весь организм в целом, включая репродуктивные органы. Повреждение эндотелия сосудов, индуцированное кадмием, ведет к структурным нарушениям сосудистой сетки семенников и яичников. **Цель** – изучить влияние эссенциальных элементов, серосодержащей аминокислоты и сорбента в комплексе на эмбриотоксическое и тератогенное действие кадмия у крыс. **Материалы и методы.** Оценку влияния соединений цинка, магния, селена, метионина и Альфасорба на эмбриотоксическое и тератогенное действие кадмия проводили на крысах в лаборатории техногенных экотоксикантов Федерального центра токсикологической, радиационной и биологической безопасности согласно руководству по экспериментальному изучению новых фармакологических веществ. Для этого после двухнедельного периода адаптации 56 нелинейных белых крыс – самок массой 195–240 г были распределены по принципу аналогов на четыре группы по 14 особей в каждой. Первая группа была биологическим контролем, вторая – получала кадмий (II) с кормом 0,12 мг/кг, третья – цинк (II) 25 мг/кг, магний (II) 10 мг/кг, селен (IV) 150 мкг/л питьевой воды, метионин 10 мг/кг и Альфасорб 1 % от рациона, четвертая – соединения кадмия с добавлением компонентов третьей группы. **Результаты исследований.** Результаты исследования свидетельствуют о том, что цинк, магний, селен, метионин и Альфасорб в вышеупомянутых дозах не обладают эмбриотоксическими и тератогенными свойствами. Кроме того, добавление их в рацион крыс, подвергшихся воздействию кадмия, способствует сохранению выживаемости и своевременному развитию потомства.

Ключевые слова: кадмий, эссенциальные элементы, аминокислота, сорбент, эмбриотоксичность

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Потапова С. Н., Кадиков И. Р., Сагдеев Д. Р., Вафин И. Ф. Влияние цинка (II), магния (II), селена (IV), метионина и Альфасорба на эмбриотоксическое и тератогенное действие кадмия у крыс // Вестник Марийского государственного университета. Серия «Сельскохозяйственные науки. Экономические науки». 2022. Т. 8. № 3. С. 272–279. DOI: <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2022-8-3-272-279>

**THE EFFECT OF ZINC (II), MAGNESIUM (II), SELENIUM (IV), METHIONINE
AND ALPHASORB ON CADMIUM EMBRYOTOXICITY AND TERATOGENICITY IN RATS****S. N. Potapova, I. R. Kadikov, D. R. Sagdeev, I. F. Vafin**

Federal Center for Toxicological, Radiation and Biological Safety, Kazan, Russian Federation

Abstract. Introduction. Cadmium is one of the most persistent environmental pollutants. Its long-term toxic effect damages not only the main storage organs, but also the entire body as a whole, including the reproductive organs. The endothelial damage induced by cadmium leads to structural vascular defects in testes and ovaries. **The purpose** of the present research is to study the complex effect of essential elements, sulfur-containing amino acid and sorbent on cadmium embryotoxicity and teratogenicity in rats. **Materials and methods.** The effect of zinc, magnesium, selenium, methionine and Alfasorb compounds on the embryotoxic and teratogenic effects of cadmium was evaluated on rats in the laboratory of technogenic ecotoxicants at the Federal Center for Toxicological, Radiation and Biological Safety according to the guidelines for the experimental study of new pharmacological substances. Experimentally, after a two-week adaptation period, 56 nonlinear white female rats weighing 195–240 g were divided according to the principle of analogues into four groups of 14 individuals each. The first group was biological control, the second received cadmium (II) with feed 0.12 mg / kg, the third – zinc (II) 25 mg / kg, magnesium (II) 10 mg / kg, selenium (IV) 150 µg / l of drinking water, methionine 10 mg / kg and Alfasorb 1 % of the diet, the fourth received cadmium with the addition of components of the third group. **Research results, discussion.** The results of the study indicate that zinc, magnesium, selenium, methionine and Alphasorb in the

above doses are not embryotoxic and teratogenic. Furthermore, the inclusion of these additives in the diet of rats exposed to cadmium contributes to the preservation of survival and timely development of offspring.

Keywords: cadmium, essential elements, amino acid, sorbent, embryotoxicity

The authors declare no conflict of interest.

For citation: Potapova S. N., Kadikov I. R., Sagdeev D. R., Vafin I. F. The effect of zinc (II), magnesium (II), selenium (IV), methionine and Alphasorb on cadmium embryotoxicity and teratogenicity in rats. *Vestnik of the Mari State University. Chapter "Agriculture. Economics"*, 2022, vol. 8, no. 3, pp. 272–279. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2022-8-3-272-279>

Введение

Кадмий является одним из самых стойких загрязнителей окружающей среды [6; 7]. Несмотря на строгие ограничения, введенные в Российской Федерации и странах Европы в отношении этого элемента, и наличие достаточно хороших и современных очистных сооружений, превышения по содержанию кадмия регистрируют и в настоящее время [1; 15; 22]. Это связано с его способностью к миграции и кумуляции [7; 14]. Поступая через загрязненный воздух, воду и продукты питания, он постепенно накапливается в организме. Основными органами его накопления являются печень, эпителиальные клетки канальцев почек и костная ткань [6].

Период полувыведения кадмия может варьировать в пределах 20–40 лет¹. Длительное токсическое его действие повреждает не только основные органы-накопители, но и весь организм в целом, включая репродуктивные органы [16]. Повреждение эндотелия сосудов, индуцированное кадмием, ведет к структурным нарушениям сосудистой сетки семенников и яичников [13; 14; 16]. В семенниках нарушается процесс сперматогенеза – уменьшаются объем, плотность и количество сперматозоидов, увеличивается количество аномальных форм, нарушается их подвижность, возникают проблемы с секреторной функцией придаточных желез, фертильностью и снижается уровень тестостерона в сыворотке крови [3; 16]. В яичниках также нарушается процесс созревания ооцитов, образования женских половых гормонов и овуляция [14]. Продолжительное воздействие на плод даже низких концентраций кадмия может привести к необратимым нарушениям развития, снижению

веса новорожденных, преждевременным родам или даже прерыванию беременности [14; 16; 20].

В предыдущих наших исследованиях была изучена защитная роль эссенциальных элементов, серосодержащей аминокислоты и сорбента против воздействия кадмия на основные органы-депо [4; 5; 8; 21].

Целью настоящего исследования явилось изучение их комплексного влияния на эмбриотоксическое и тератогенное действие кадмия у крыс.

Материал и методика исследований

Оценку влияния соединений цинка, магния, селена, метионина и Альфасорба на эмбриотоксическое и тератогенное действие кадмия проводили в лаборатории техногенных экотоксикантов ФГБНУ «ФЦТРБ-ВНИВИ» на лабораторных крысах согласно руководству по экспериментальному (доклиническому) изучению новых фармакологических веществ². Были изучены характеристики антенатального и постнатального периодов развития потомства самок подопытных животных. Для этого после двухнедельного периода адаптации 56 нелинейных белых крыс – самок массой 195–240 г были распределены по принципу аналогов на четыре группы по 14 особей в каждой. Первая группа служила биологическим контролем, вторая – получала кадмий (CdCl_2) с кормом из расчета 0,12 мг на кг живой массы, третья – цинк (ZnCl_2) 25 мг на кг живой массы, магний ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$) 10 мг на кг живой массы, селен (Na_2SeO_3) 150 мкг на литр питьевой воды, метионин 10 мг на кг живой массы и Альфасорб 1 % от рациона, четвертая – кадмий (II) с добавлением компонентов третьей группы. На 16-й день опыта к

¹ World Health Organization. Air quality guidelines for Europe. 2000.

² Хабриев Р. У. Руководство по экспериментальному (доклиническому) изучению новых фармакологических веществ. М. : Медицина, 2005. С. 832.

самкам были подсажены самцы для спаривания (в соотношении 2:1) на 2 эстральных цикла. Первым днем беременности условно считали день обнаружения сперматозоидов в вагинальных мазках. Во время всего опыта проводили наблюдение за поведением и состоянием беременных самок. На 20-й день беременности из каждой группы было взято выборочно по 9 животных и были подвергнуты эвтаназии. В ходе вскрытия определяли состояние яичников (количество желтых тел), матки (мест имплантации, резорбции, количество живых плодов), а также проводили подсчет предимплантационной и постимплантационной гибели. Оставшихся беременных самок отсаживали в отдельные клетки и дожидались родов для дальнейшего изучения их потомства. У рожденных крысят регистрировали динамику изменения массы тела, сроки отлипания ушей, появление первичного волосяного покрова, прорезывание резцов, открытие глаз, опускание семенников и открытие влагалища в течение 30 суток.

На протяжении всего эксперимента животные находились в стандартных условиях со свободным доступом к сбалансированному корму и питьевой воде. Эвтаназия и хирургические вмешательства проводили в соответствии с требова-

ниями «Европейской конвенции по защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях»¹.

Обработку цифрового материала проводили методом вариационной статистики с применением критерия достоверности по Стьюденту.

Результаты исследований и их обсуждение

Наблюдение в ходе исследования показало, что общее состояние животных было удовлетворительным. Аппетит был сохранен на протяжении всего опыта.

Результаты вскрытия самок на 20-й день беременности представлены в таблице 1. Было обнаружено, что у особей, подвергшихся воздействию кадмия (II), снизилось количество желтых тел в яичнике до $9,20 \pm 0,63$ ($p < 0,01$), а соответственно, мест имплантации и плодов в матке на 25 % и 27 % в сравнении с контрольными значениями. Количество резорбций не имело статистически значимых отличий, а предимплантационная и постимплантационная гибель выросла на 2 % и 5 % соответственно. Масса плодов и краниокаудальные размеры в среднем снизились на 1 г ($p < 0,001$) и 0,6 мм ($p < 0,001$). Схожие изменения были получены нами и в предыдущих исследованиях [2].

Таблица 1 / Table 1

Влияние соединений цинка, магния, селена, метионина и Альфасорба на эмбриотоксическое действие кадмия /
The effect of zinc, magnesium, selenium, methionine and Alphisorb on cadmium embryotoxicity

Показатель, единица измерения / Indicator, unit of measurement	Группа / Groups			
	1 Биологический контроль	2 Cd(II)	3 Zn(II)+Mg(II)+Se(IV)+ Метионин+ Альфасорб	4 Cd(II)+ Zn(II)+ Mg(II)+Se(IV)+ Метионин+Альфасорб
Количество беременных самок	9	9	9	9
Количество желтых тел	$12,23 \pm 0,54$	$9,20 \pm 0,63^{**}$	$12,56 \pm 0,58$	$12,03 \pm 0,61$
Количество мест имплантации	$11,05 \pm 0,32$	$8,11 \pm 0,54^{***}$	$11,38 \pm 0,44$	$10,82 \pm 0,52$
Количество резорбций	$0,30 \pm 0,02$	$0,30 \pm 0,03$	$0,30 \pm 0,02$	$0,30 \pm 0,01$
Количество живых плодов	$10,19 \pm 0,35$	$7,05 \pm 0,56^{***}$	$10,39 \pm 0,33$	$9,56 \pm 0,50$
Количество мертвых плодов	0	0	0	0
Предимплантационная гибель, %	9,65	11,85	9,39	10,06
Постимплантационная гибель, %	7,78	13,07	8,70	11,65
Масса плода, г	$3,60 \pm 0,05$	$2,43 \pm 0,08^{***}$	$3,82 \pm 0,05^{**}$	$3,47 \pm 0,06$
Краниокаудальный размер, мм	$3,77 \pm 0,03$	$3,20 \pm 0,06^{***}$	$3,79 \pm 0,05$	$3,36 \pm 0,04^{***}$

Примечание: * - $p < 0,05$, ** - $p < 0,01$, *** - $p < 0,001$

¹ European Treaty Series. No. 123 – European Convention for the Protection of Vertebrate Animals used for Experimental and Other Scientific Purposes. Strasbourg, III. 1986. 18.

В третьей группе животных, в рацион которых дополнительно был введен комплекс из эссенциальных элементов, аминокислоты и сорбента, статистически значимых различий по исследуемым показателям выявлено не было, кроме массы плодов, которая выросла на 0,12 г ($p < 0,01$). Добавление данных компонентов загрязненным животным (группа 4) значительно снизило изменения, вызванные кадмием. При этом

количество желтых тел в яичнике, мест имплантации и живых плодов статистически не отличались от значений контрольной группы, а в сравнении с показателями второй группы – были выше в среднем на 25 %. Предимплантационная и постимплантационная гибель снизилась на 1,79 % и 1,42 %, масса плода и краниокаудальный размер увеличились на 1 г и 0,16 мм соответственно.

Таблица 2 / Table 2

Постнатальное развитие потомства крыс / Postnatal development of rat offspring

Показатель, единица измерения / Indicator, unit of measurement	Группа / Group			
	1 Биологический контроль	2 Cd(II)	3 Zn(II)+Mg(II) +Se(IV)+ Метионин+ Альфасорб	4 Cd(II)+Zn(II)+ Mg(II)+Se(IV)+ Метионин+ Альфасорб
Продолжительность беременности, сут	21,22±0,12	21,18±0,56	21,34±0,43	21,19±0,39
Количество новорожденных крысят в помете	10,19±0,66	7,05±0,85*	10,39±0,70	9,56±0,74
Масса тела на – 15 сут – 30 сут	18,12±0,57 43,31±0,65	15,23±0,47*** 38,46±0,31***	18,43±0,50 43,76±0,36	17,55±0,62 42,34±0,49
Отлипание ушной раковины, сут	2,57±0,14	2,83±0,16	2,50±0,15	2,68±0,15
Появление первичного волосяного покрова, сут	5,48±0,17	5,75±0,19	5,39±0,18	5,59±0,15
Прорезывание резцов, сут	8,26±0,64	8,55±0,74	8,19±0,53	8,29±0,68
Открытие глаз, сут	14,84±0,28	15,14±0,49	14,65±0,21	14,95±0,35
Опускание семенников, сут	27,41±0,44	29,12±0,63*	27,07±0,46	27,80±0,52
Открытие влагалища, сут	32,65±0,64	33,60±0,88	32,43±0,52	32,77±0,68
Выживаемость к 30 дню, %	97	88	99	94

Примечание: * - $p < 0,05$, ** - $p < 0,01$, *** - $p < 0,001$

При изучении постнатального развития потомства крыс (табл. 2) обнаружили, что у особей, ранее подвергшихся воздействию кадмия, достоверно уменьшилось количество новорожденных в помете (30 %). При этом крысята отставали в наборе массы в среднем на 13 %, срок опускания семенников и открытие влагалища увеличился на 1 сутки.

У крысят, рожденных от особей, получавших эссенциальные элементы, аминокислоту и сорбент (группы 3 и 4), статистически значимых различий с контрольной группой ни по одному показателю выявлено не было. Причем у загра-

вленных особей, получавших исследуемые компоненты (группа 4), в сравнении с особями без терапии (группа 2), увеличилось количество новорожденных в помете на 36 %, масса тела крысят в среднем – на 12 %, выживаемость приплода – с 88 % до 94 %.

Ведущая роль в патогенезе отравлений кадмием отводится повреждению функций антиоксидантной защиты организма [11; 18]. Индуцированное кадмием увеличение продукции активных форм кислорода приводит к избыточному окислению белков, липидов, ДНК и гибели клеток [19; 17]. Таким образом, нарушается

нормальная работа многих органов и систем, включая репродуктивную – подавляются функции яичников, снижается стероидогенез, возникают кровотечения и некроз [17; 16]. Кроме этого, за счет способности ионов кадмия имитировать ионы эссенциальных элементов и замещать их в активных центрах, нарушается микроэлементный баланс организма, ведущий к дисфункции многих ферментов¹ [9; 21]. В ранее проведенных исследованиях нами была продемонстрирована защитная роль цинка, магния и селена против индуцированного кадмием окислительного стресса, патологического накопления во внутренних органах, нарушения работы печени и почек [4; 5; 8; 21]. Также был смоделирован эксперимент по изучению репродуктивной токсичности кадмия на фоне совместного применения цинка и магния [2]. Такой комплекс был менее эффективен в сравнении с настоящим, что также связано с меньшим количеством использованного магния. В данном случае использован

ряд эссенциальных элементов-антиоксидантов совместно с аминокислотой и сорбентом. Цинк, магний и селен входят в состав многих ферментов, поддерживающих многие процессы организма и играющих важнейшую роль в работе репродуктивной системы² [9; 10]. Метионин, являясь дополнительным источником серы, и Алфасорб также будут способствовать уменьшению развития оксидативного стресса и накоплению кадмия, что, вероятнее всего, стало причиной уменьшения эмбриотоксического действия кадмия.

Заключение

Результаты исследования свидетельствуют о том, что такие эссенциальные элементы, как цинк, магний, селен, метионин и Альфасорб, в вышеупомянутых дозах не обладают эмбриотоксическими и тератогенными свойствами. Кроме того, добавление их в рацион крыс, подвергшихся воздействию кадмия, способствует сохранению выживаемости и своевременному развитию потомства.

² Там же.

¹ European Treaty Series. No. – 123. European Convention for the Protection of Vertebrate Animals used for Experimental and Other Scientific Purposes. Strasbourg, III. 1986. 18.

1. Ахполова В. О., Брин В. Б. Современные представления о кинетике и патогенезе токсического воздействия тяжелых металлов (обзор литературы) // Вестник новых медицинских технологий. 2020. Т. 27. № 1. С. 55–61. DOI: <https://doi.org/10.24411/1609-2163-2020-16578>

2. Влияние цинка и магния на репродуктивную токсичность у крыс под воздействием кадмия / Потапова С. Н. [и др.] // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н. Э. Баумана. 2021. Т. 248. № 4. С. 178–181. DOI: <https://doi.org/10.31588/2413-4201-1883-248-4-178-181>

3. Жегалова И. В., Чумакова З. В., Юрасов В. В. Кадмий и репродуктивное здоровье мужчин // Микроэлементы в медицине. 2018. Т. 19. № 1. С. 24–34. URL: <https://repository.rudn.ru/ru/records/article/record/12651/> (дата обращения: 15.09.2022).

4. Потапова С. Н. Влияние магния и цинка на организм крыс, подвергшихся воздействию кадмия // Ветеринарный врач. 2021. № 1. С. 44–50. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyaniye-magniya-i-tsinka-na-organizm-krys-podverghshisya-vozdeystviyu-kadmiya> (дата обращения: 19.08.2022).

5. Применение шунгита и цеолита цыплятам-бройлерам на фоне отравления тяжелыми металлами / Кадиков И. Р. [и др.] // Ветеринария. 2020. № 2. С. 60–64. DOI: <https://doi.org/10.30896/0042-4846.2020.23.2.60-64>

6. Снежный покров как индикатор загрязнения атмосферного воздуха вблизи ТЭЦ мицелиальными грибами и тяжелыми металлами / Потехина Р. М. [и др.] // Ветеринарный врач. 2021. № 3. С. 39–45. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/snezhnyy-pokrov-kak-indikator-zagryazneniya-atmosfernogo-vozduha-vblizi-tets-mitselialnymi-gribami-i-tyazhelymi-metallami> (дата обращения: 23.08.2022).

7. Экоотоксикологический мониторинг сельскохозяйственной и пищевой продукции в Республике Татарстан / Конюхова В. А. [и др.] // Актуальные проблемы ветеринарной медицины. 2018. С. 145–148. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32798351> (дата обращения: 15.08.2022).

8. Эффективность применения селенита натрия при поступлении кадмия в организм животных / Потапова С. Н. [и др.] // Современные проблемы экспериментальной и клинической токсикологии, фармакологии и экологии: сб. тезисов докладов Международной научно-практической конференции (09–10 сентября 2021 г.). Казань : Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности. 2021. С. 46. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48022019> (дата обращения: 27.08.2022).

9. Babaknejad N. [et al.] Cadmium testicular toxicity in male Wistar rats: protective roles of zinc and magnesium // Biological trace element research. 2018. Vol. 185. No. 1. Pp. 106–115. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12011-017-1218-5>

10. Chouchene L. [et al.] Interference with zinc homeostasis and oxidative stress induction as probable mechanisms for cadmium-induced embryo-toxicity in zebrafish // Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 29. No. 26. Pp. 39578–39592.

11. Cuypers A. [et al.] Cadmium stress: an oxidative challenge // *BioMetals*. 2010. Vol. 23. No. 5. Pp. 927–940. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10534-010-9329-x>
12. El Heni J., Messaoudi I., Hamouda F., Kerkeni A. Protective effects of selenium (Se) and zinc (Zn) on cadmium (Cd) toxicity in the liver and kidney of the rat: histology and Cd accumulation // *Food Chem Toxicol*. 2008. Vol. 46 (11). Pp. 3522–3527. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.08.037>
13. Fagerberg B., Bergstrom G., Boren J., Barregard L., Fagerberg B. Cadmium exposure is accompanied by increased prevalence and future growth of atherosclerotic plaques in 64-year-old women // *Journal of Internal Medicine*. 2012. Vol. 272. Pp. 601–610. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2796.2012.02578.x>
14. Giuseppe Genchi. The Effects of Cadmium Toxicity / Giuseppe Genchi, Maria Stefania Sinicropi, Graziantonio Lauria, Alessia Carocci, Alessia Catalano // *BInt. J. Environ. Res. Public Health*. 2020. Vol. 17 (3782). Pp. 1–23. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>
15. Hormozi M. [et al.] The biochemical effects of occupational exposure to lead and cadmium on markers of oxidative stress and antioxidant enzymes activity in the blood of glazers in tile industry // *Toxicol Ind Health*. 2018. Vol. 34. No. 7. Pp. 459–467. DOI: <https://doi.org/10.1177/0748233718769526>
16. Kumar S., Sharma A. Cadmium toxicity: effects on human reproduction and fertility // *Reviews on Environmental Health*. 2019. Vol. 34 (4). Pp. 327–338. DOI: <https://doi.org/10.1515/reveh-2019-0016>
17. Li X. [et al.] Effects of selenium-lead interaction on the gene expression of inflammatory factors and selenoproteins in chicken neutrophils // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2017. Vol. 139. Pp. 447–453. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.02.017>
18. Lin A. [et al.] Oxidative stress and DNA damages induced by cadmium accumulation // *Journal of Environmental Sciences*. 2007. Vol. 19. No. 5. Pp. 596–602. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(07\)60099-0](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(07)60099-0)
19. Rahimzadeh M. R. [et al.] Cadmium toxicity and treatment: An update // *Caspian Journal of Internal Medicine*. 2017. Vol. 8. No. 3. P. 135. DOI: <https://doi.org/10.22088/cjim.8.3.135>
20. Thompson J., Bannigan J. Cadmium: toxic effects on the reproductive system and the embryo // *Reproductive Toxicology*. Elmsford, N. Y. 2008. Vol. 25 (3). Pp. 304–315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2008.02.001>
21. Timofeeva S. N. [et al.] The effects of zinc and magnesium ingestion on essential trace-element accumulation in the organs of white rats upon cadmium exposure // *BIO Web of Conferences*. EDP Sciences, 2020. Vol. 27. P. 00110. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202700110>
22. Vervaeke B. A., D'Haese P. C., Verhulst A. Environmental toxin-induced acute kidney injury // *Clin Kidney J*. 2017. Vol. 10. No. 6. Pp. 747–758. DOI: <https://doi.org/10.1093/cjk/sfx062>

Статья поступила в редакцию 05.09.2022 г.; одобрена после рецензирования 04.10. 2022 г.; принята к публикации 11.10.2022 г.

Об авторах

Потапова Светлана Николаевна

младший научный сотрудник, Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности (420075, Российская Федерация, г. Казань, Научный городок, д. 2), ORCID: <https://orcid.org/0000000162043434>, svetlana150895@yandex.ru

Кадиков Ильнур Равилевич

доктор биологических наук, заведующий лабораторией техногенных экотоксикантов, Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности (420075, Российская Федерация, г. Казань, Научный городок, д. 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3184-7779>, cir6@yandex.ru

Сагдеев Даниль Рустамович

младший научный сотрудник, Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности (420075, Российская Федерация, г. Казань, Научный городок, д. 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2947-0041>, sagdeevdanil@mail.ru

Вафин Искандер Фоатович

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности (420075, Российская Федерация, г. Казань, Научный городок, д. 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0587-6477>, millu84@rambler.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

1. Akhpolova V. O., Brin V. B. Sovremennye predstavleniya o kinetike i patogeneze toksicheskogo vozdeistviya tyazhelykh metallov (obzornyye literaturnyye) [Actual concepts of heavy metals' kinetics and pathogenesis of toxicity]. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologii* = Journal of New Medical Technologies, 2020, vol. 27, no. 1, pp. 55–61. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/1609-2163-2020-16578>
2. Potapova S. N. [et al.] Vliyaniye tsinka i magniya na reproduktivnuyu toksichnost' u krysov pod vozdeistviem kadmiiya [Effect of zinc and magnesium on reproductive toxicity in rats under the exposure of cadmium]. *Uchenye zapiski Kazanskoi gosudarstvennoi akademii veterinarnoi meditsiny im. N. E. Baumana* = Scientific Notes of the Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine, 2021, vol. 248, no. 4, pp. 178–181. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31588/2413-4201-1883-248-4-178-181>
3. Zhegalova I. V., Chumakova Z. V., Yurasov V. V. Kadmii i reproduktivnoye zdorov'e muzhchin [Cadmium and reproductive health of men]. *Mikroelementy v meditsine* = Trace Elements in Medicine, 2018, vol. 19, no. 1, pp. 24–34. Available at: <https://repository.rudn.ru/ru/records/article/record/12651/> (accessed 15.08.2022). (In Russ.).
4. Potapova S. N. Vliyaniye magniya i tsinka na organizm krysov, podvergnutyykh vozdeistviyu kadmiiya [The effect of magnesium and zinc on rats treated with cadmium]. *Veterinarnyy vrach* = The Veterinarian, 2021, no. 1, pp. 44–50. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyaniye-magniya-i-tsinka-na-organizm-krysov-podvergnutyykh-vozdeistviyu-kadmiiya> (accessed 19.08.2022). (In Russ.).
5. Kadikov I. R. [et al.] Primeneniye shungita i teolita tsyplyatam-broileram na fone otravleniya tyazhelymi metallami [Use of shungite and zeolite in chicken-broiler diets]. *Veterinariya* = Veterinary Medicine, 2020, no. 2, pp. 60–64. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30896/0042-4846.2020.23.2.60-64>
6. Potekhina R. M. [et al.] Snezhnyy pokrov kak indikator zagryazneniya atmosfernogo vozdukh vblizi TPP s mitseliyami gribami i tyazhelymi metallami [Snow cover as an indicator of atmospheric air pollution near TPP with mycelial fungi and heavy metals]. *Veterinarnyy vrach* = The Veterinarian, 2021, no. 3, pp. 39–45. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/snezhnyy-pokrov-kak-indikator-zagryazneniya-atmosfernogo-vozdukh-vblizi-tpp-s-mitseliyami-gribami-i-tyazhelymi-metallami> (accessed 23.08.2022). (In Russ.).
7. Konyukhova V. A. [et al.] Ekotoksikologicheskii monitoring sel'skokhozyaistvennoi i pishchevoi produktsii v Respublike Tatarstan [Ecotoxicological monitoring of agricultural and food products in the Republic of Tatarstan]. *Aktual'nye problemy veterinarnoi meditsiny: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii posvyashchennoi 90-letiyu so dnya rozhdeniya profesora V. A. Kirshina (Kazan', 05–06 aprelya 2018 g.)* = Actual Problems of Veterinary Medicine: materials of the International scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of the birth of Professor V. A. Kirshin (Kazan, 05–06 April, 2018), Kazan, Publ. house of the Federal Center for Toxicological, Radiation and Biological Safety, 2018, pp. 145–148. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32798351> (accessed 15.08.2022). (In Russ.).
8. Potapova S. N. [et al.] Effektivnost' primeneniya selenita natriya pri postuplenii kadmiiya v organizm zhivotnykh [The effectiveness of the use of sodium selenite when cadmium enters the body of animals]. *Sovremennyye problemy eksperimental'noi i klinicheskoi toksikologii, farmakologii i ekologii: sb. tezisov dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* = Modern problems of experimental and clinical toxicology, pharmacology and ecology: collection of abstracts of the International scientific and practical conference (September 09–10, 2021, Kazan), Kazan, Publ. house of the Federal Center for Toxicological, Radiation and Biological Safety, 2021, p. 46. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48022019> (accessed 27.08.2022). (In Russ.).
9. Babaknejad N. [et al.] Cadmium testicular toxicity in male Wistar rats: protective roles of zinc and magnesium. *Biological trace element research*, 2018, vol. 185, no. 1, pp. 106–115. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1007/s12011-017-1218-5>
10. Chouchene L. [et al.] Interference with zinc homeostasis and oxidative stress induction as probable mechanisms for cadmium-induced embryo-toxicity in zebrafish. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, vol. 29, no. 26, pp. 39578–39592. (In Eng.).
11. Cuypers A. [et al.] Cadmium stress: an oxidative challenge. *BioMetals*, 2010, vol. 23, no. 5, pp. 927–940. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10534-010-9329-x>
12. El Heni J., Messaoudi I., Hamouda F., Kerkeni A. Protective effects of selenium (Se) and zinc (Zn) on cadmium (Cd) toxicity in the liver and kidney of the rat: histology and Cd accumulation. *Food Chem Toxicol*, 2008, vol. 46 (11), pp. 3522–3527. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.08.037>
13. Fagerberg B., Bergstrom G., Boren J., Barregard L., Fagerberg B. Cadmium exposure is accompanied by increased prevalence and future growth of atherosclerotic plaques in 64-year-old women. *Journal of Internal Medicine*, 2012, vol. 272, pp. 601–610. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2796.2012.02578.x>
14. Giuseppe G., Sinicropi M. S., Lauria G., Carocci A., Catalano A. The effects of cadmium toxicity. *BInt. J. Environ. Res. Public Health*, 2020, vol. 17 (3782), pp. 1–23. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>
15. Hormozi M. [et al.] The biochemical effects of occupational exposure to lead and cadmium on markers of oxidative stress and antioxidant enzymes activity in the blood of glaziers in tile industry. *Toxicol Ind Health*, 2018, vol. 34, no. 7, pp. 459–467. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1177/0748233718769526>
16. Kumar S., Sharma A. Cadmium toxicity: effects on human reproduction and fertility. *Reviews on Environmental Health*, 2019, vol. 34 (4), pp. 327–338. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1515/revh-2019-0016>
17. Li X. [et al.] Effects of selenium-lead interaction on the gene expression of inflammatory factors and selenoproteins in chicken neutrophils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, vol. 139, pp. 447–453. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.02.017>

18. Lin A. [et al.] Oxidative stress and DNA damages induced by cadmium accumulation. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, vol. 19, no. 5, pp. 596–602. (In Eng.). DOI: [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(07\)60099-0](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(07)60099-0)
19. Rahimzadeh M. R. [et al.] Cadmium toxicity and treatment: An update. *Caspian Journal of Internal Medicine*, 2017, vol. 8, no. 3, 135 p. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.22088/cjim.8.3.135>
20. Thompson J., Bannigan J. Cadmium: toxic effects on the reproductive system and the embryo. *Reproductive Toxicology*, (Elmsford N. Y.), 2008, vol. 25 (3), pp. 304–315. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2008.02.001>
21. Timofeeva S. N. [et al.] The effects of zinc and magnesium ingestion on essential trace-element accumulation in the organs of white rats upon cadmium exposure. *BIO Web of Conferences. EDP Sciences*, 2020, vol. 27, pp. 00110. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202700110>
22. Vervaet B. A., D'Haese P. C., Verhulst A. Environmental toxin-induced acute kidney injury. *Clin Kidney J.*, 2017, vol. 10, no. 6, pp. 747–758. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1093/ckj/sfx062>

The article was submitted 05.09.2022; approved after reviewing 04.10.2022; accepted for publication 11.10.2022.

About the authors

Svetlana N. Potapova

Junior Researcher, Federal Center for Toxicological, Radiation and Biological Safety (2 Nauchny gorodok, Kazan 420075, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000000162043434>, svetlana150895@yandex.ru

Ilnur R. Kadikov

Dr. Sci. (Biology), Head of the Laboratory of Technogenic Ecotoxicants, Federal Center for Toxicological, Radiation and Biological Safety (2 Nauchny gorodok, Kazan 420075, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3184-7779>, cir6@yandex.ru

Danil R. Sagdeev

Junior Researcher, Federal Center for Toxicological, Radiation and Biological Safety (2 Nauchny gorodok, Kazan 420075, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2947-0041>, sagdeevdanil@mail.ru

Iskander F. Vafin

Ph. D. (Biology), Senior Researcher, Federal Center for Toxicological, Radiation and Biological Safety (2 Nauchny gorodok, Kazan 420075, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0587-6477>, millu84@rambler.ru

All authors have read and approved the final manuscript.