

Научная статья

УДК 597.8: 612.176: 591.16

<https://doi.org/10.26897/2949-4710-2026-4-1-1-05>



Изменения процесса пролиферации кардиомиоцитов озерной лягушки *Pelophylax ridibundus* (Pallas, 1771) под действием ионов кадмия

Елена Юрьевна Руденко¹, Максим Викторович Милютин²,
Алиса Анатольевна Агаркова³, Турсумбай Сатымбаевич Кубатбеков³

¹ ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России (Пироговский Университет)

² Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, Обнинск, Россия

³ Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Елена Юрьевна Руденко,
e_rudenko@rambler.ru

Аннотация

Исследовали изменения процесса пролиферации кардиомиоцитов озерной лягушки *Pelophylax ridibundus* (Pallas, 1771) в период метаморфоза головастика, происходящие под действием различных концентраций ионов кадмия. Личинок озерной лягушки выращивали в прудовой воде, содержащей 0.002 мг/л, 0.02 мг/л и 0.1 мг/л ионов кадмия. Для получения изолированных кардиомиоцитов использовали метод щелочной диссоциации тканей. В мазках изолированных клеток подсчитывали митотический индекс (процентное содержание делящихся клеток) и индекс двуядерных кардиомиоцитов (процентное содержание двуядерных клеток). Проведенные исследования показали, что развитие головастика озерной лягушки в воде, содержащей различные концентрации ионов кадмия, не вызывает существенных изменений морфологии сердечных миоцитов. Большинство кардиомиоцитов имеют цилиндрическую форму, овальное, центрально расположенное ядро и небольшое количество боковых и концевых отростков. Наряду с одноядерными встречаются и двуядерные кардиомиоциты. Под влиянием на организм головастика озерной лягушки ионов кадмия в различных концентрациях, содержащихся в среде обитания личинок озерной лягушки, в период метаморфоза головастика в молодых лягушат происходит угнетение пролиферативной активности сердечных мышечных клеток предсердий и желудочка на всех изученных стадиях развития, которое особенно заметно при воздействии на организм ионов кадмия в концентрации 0.02 мг/л. При этом наблюдается закономерное снижение индекса двуядерных кардиомиоцитов в предсердии и желудочке сердца озерной лягушки. Изменение протекания процесса пролиферации сердечных миоцитов может быть обусловлено нарушением синтеза или структурной организации белков цитоскелета, принимающих участие в формировании веретена деления и расхождении хромосом в анафазе митоза.

Ключевые слова

Кадмий, кардиомиоциты, пролиферация, дифференцировка, озерная лягушка

Для цитирования

Руденко Е.Ю., Милютин М.В., Агаркова А.А., Кубатбеков Т.С. Изменения процесса пролиферации кардиомиоцитов озерной лягушки *Pelophylax ridibundus* (Pallas, 1771) под действием ионов кадмия. *Тимирязевский биологический журнал*. 2026;4(1):105. <https://doi.org/10.26897/2949-4710-2026-4-1-1-05>



Changes in cardiomyocyte proliferation process of the lake frog *Pelophylax ridibundus* (Pallas, 1771) under the effect of cadmium ions

Elena Yu. Rudenko¹, Maksim V. Milyutin², Alisa A. Agarkova³, Tursumbai S. Kubatbekov³

¹ Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
«N.I. Pirogov Russian National Research Medical University» of the Ministry of Health of the Russian Federation

² Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Research Nuclear University “MEPhI”,
Obninsk, Russia

³ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

Corresponding author: Elena Yu. Rudenko, e_rudenko@rambler.ru

Abstract

The study investigated changes in the cardiomyocyte proliferation process of the lake frog *Pelophylax ridibundus* (Pallas, 1771) during tadpole metamorphosis under the effect of various concentrations of cadmium ions. Lake frog larva were raised in pond water containing 0.002 mg/L, 0.02 mg/L, and 0.1 mg/L of cadmium ions. The alkaline tissue dissociation method was used to obtain isolated cardiomyocytes. The mitotic index (percentage of dividing cells) and the index of binucleated cardiomyocytes (percentage of binucleated cells) were counted in smears of isolated cells. The research showed that the development of lake frog tadpoles in water containing various concentrations of cadmium ions did not cause significant changes in the morphology of cardiac myocytes. Most cardiomyocytes had a cylindrical shape, an oval centrally located nucleus, and a small number of lateral and terminal processes. Both uninucleated and binucleated cardiomyocytes were present. Under the effect of cadmium ions at various concentrations in the tadpoles' environment during the metamorphosis period, there was an inhibition of proliferative activity of cardiac muscle cells in the atria and ventricle at all studied developmental stages. This effect was most noticeable at a cadmium concentration of 0.02 mg/L. A systematic decrease in the index of binucleated cardiomyocytes in the atrium and ventricle of the lake frog was observed. The altered course of cardiomyocyte proliferation of cardiac myocytes may be due to disruption of the synthesis or structural organization of cytoskeleton proteins involved in spindle formation and chromosome separation during anaphase of mitosis.

Keywords

Cadmium, cardiomyocytes, proliferation, differentiation, lake frog

For citation

Rudenko E.Yu., Milyutin M.V., Agarkova A.A., Kubatbekov T.S. Changes in cardiomyocyte proliferation process of the lake frog *Pelophylax ridibundus* (Pallas, 1771) under the effect of cadmium ions. *Timiryazev Biological Journal*. 2026;4(1):105. https://doi.org/10.26897/2949-4710-2026-4-1-1-05

Введение

Introduction

Кадмий является глобальным загрязнителем окружающей среды, обладающим длительным периодом полураспада и низкой скоростью выведения из различных компонентов экосистем [2]. Загрязнение окружающей среды кадмием происходит при добыче и переработке полезных ископаемых, производстве удобрений и утилизации отходов. Кадмий оказывает токсическое воздействие на почки, скелет, дыхательную и сердечно-сосудистую системы представителей различных классов позвоночных животных [2].

Амфибий от представителей других классов позвоночных животных отличает высокая

восприимчивость к загрязняющим веществам, встречающимся в среде их обитания, являющаяся следствием двойного (водного и наземного) жизненного цикла, миграции в различные места размножения, а также высокой проницаемости их кожных покровов. Благодаря этому амфибий можно использовать в качестве адекватных индикаторов состояния окружающей среды, однако токсикологические исследования амфибий являются довольно скудными по сравнению с исследованиями представителей других классов позвоночных животных [3]. Выбор личинок бесхвостых амфибий в качестве биомаркера может позволить оценить эффект воздействия на организм ионов кадмия, обычно содержащихся в воде в концентрациях, которые редко бывают достаточно высокими, чтобы напрямую

вызывать смертность, а скорее нарушают какой-либо механизм (например, работу сердца), что ухудшает поддержание гомеостаза организма в целом.

Большинство исследований эффектов воздействия ионов кадмия на амфибий было сосредоточено на негативном влиянии ксенобиотиков на рост, развитие и поведение головастика бесхвостых амфибий. При воздействии ионов кадмия на амфибий обнаружены задержка метаморфоза, снижение роста, тератогенез кожи, глаз и пищеварительной системы, деформации сердца. Однако были проведены лишь единичные исследования, посвященные влиянию ионов кадмия на развитие сердца амфибий, особенно его токсикологическому влиянию на дифференцировку кардиомиоцитов [3, 4].

Цель исследований: анализ изменений процесса пролиферации кардиомиоцитов озерной лягушки *Pelophylax ridibundus* (Pallas, 1771) в период метаморфоза головастика, происходящих под действием различных концентраций ионов кадмия.

Методика исследований

Research method

Исследования проводили на личинках, выловленных в период их массового развития в естественном водоеме Красноглинского района города Самары. Принадлежность пойманных животных к виду *P.* устанавливали по соответствующему определителю [5]. В связи с отсутствием таблиц эмбрионального онтогенеза озерной лягушки стадии развития зародышей и головастика *P.* определяли по таблицам зародышевого и личиночного развития травяной лягушки *Rana temporaria* (Linnaeus, 1758) [6], в соответствии с общими признаками строения их личинок.

По 5 личинок 49 стадии эмбрионального онтогенеза помещали в стеклянные аквариумы вместимостью 5 дм³, наполненные прудовой водой, содержащей 0.002 мг/л (I серия эксперимента), 0.02 мг/л (II серия эксперимента) и 0.1 мг/л (III серия эксперимента) ионов кадмия. Контрольных животных помещали в прудовую воду, не содержащую ионы кадмия. Для каждой экспериментальной группы, включая контрольную, использовали по три аквариума. Продолжительность фотопериода составляла 12 ч, температура воды – 22°C, pH – 7,0. Ежедневно 2/3 объема использованной воды заменяли водой того же состава. После каждой замены воды личинкам предлагали полноценный комбикорм для рыб марки «TetraMin Flakes». Забор материала производили на 51-54 стадиях развития. Забой животных осуществляли методом декапитации под хлороформовым наркозом.

Для получения изолированных кардиомиоцитов использовали метод щелочной диссоциации тканей [7], который применительно к миокарду

Pelophylax ridibundus был модифицирован для повышения степени разделения кардиомиоцитов. Для этого кусочки миокарда предсердий и желудочка фиксировали в холодном 10%-ном формалине на фосфатном буфере (pH = 7.0). После фиксации в течение 10-14 дней производили поперечные срезы ткани толщиной 1-2 мм, длиной 2-3 мм и помещали в холодильник в 50% КОН на двое суток. Затем пипеткой отбирали КОН, а кусочки ткани перекладывали в холодильник в дистиллированную воду на 7-10 суток. После двухчасовой экспозиции при комнатной температуре воду осторожно сливали, добавляли свежую дистиллированную воду из расчета 1 мл на 2 мг миокарда.

С помощью магнитной мешалки в течение 20-30 мин производили окончательное разделение кардиомиоцитов. Постоянно визуально, по возрастанию степени опалисценции суспензии, контролировали качество разделения кардиомиоцитов. Полученную суспензию наносили на предметное стекло, мазок подсушивали на воздухе при комнатной температуре, затем окрашивали гематоксилином и эозином по стандартной методике [8]. В исследованном материале имела место определенная доля неразделившихся миоцитов (8-10 на 100 клеток), поправка на неразделившиеся миоциты вносилась в расчет митотического индекса и индекса двуядерных клеток.

Митотический индекс (процентное содержание делящихся клеток) и индекс двуядерных кардиомиоцитов (процентное содержание двуядерных клеток) подсчитывали в мазках изолированных клеток на микроскопе Биомед-1 при 400-кратном увеличении для 5 тыс. клеток у каждого из объектов исследования. С помощью программы Statistica 10 определяли среднее арифметическое, стандартное отклонение и размах от минимального до максимального значений для каждого из исследуемых признаков. Статистическую достоверность различий в показателях митотического индекса и индекса двуядерных кардиомиоцитов определяли с использованием t-критерия.

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

Светомикроскопическое изучение мазков изолированных клеток, полученных при проведении щелочной диссоциации миокарда, показало, что развитие головастика озерной лягушки в воде, содержащей ионы кадмия различных концентраций, не вызывает существенных изменений морфологии сердечных миоцитов. В мазках клеток большинство кардиомиоцитов имеют цилиндрическую форму, овальное, центрально расположенное ядро и небольшое количество боковых и концевых отростков, не отличаясь от сердечных мышечных

клеток контрольных животных. Наряду с одноядерными встречаются и двуядерные кардиомиоциты. Однако на 53, и особенно часто на 54 стадиях периода метаморфоза, среди сердечных миоцитов, имеющих нормальное строение, встречаются единичные кардиомиоциты неправильной зигзагообразной формы, у которых отмечается большая выраженность конденсации хроматина ядер. Частота обнаружения подобных миоцитов возрастает по мере увеличения сроков воздействия и концентрации ионов кадмия в среде обитания головастика.

Воздействие ионов кадмия всех изученных концентраций изменяет пролиферативную активность сердечных мышечных клеток и индекс двуядерных кардиомиоцитов (рис. 1, 2).

В I серии эксперимента при действии на головастика ионов кадмия в концентрации 0.002 мг/л на 51 стадии развития митотический индекс сердечных мышечных клеток предсердий снижается в 1.4 раза, а пролиферативная активность кардиомиоцитов желудочка уменьшается в 2.15 раза. При этом индекс двуядерных кардиомиоцитов в предсердиях снижается в 1.35 раза по сравнению с контролем, а в миокарде желудочка содержание двуядерных миоцитов уменьшается в 1.55 раза. На 52 стадии личиночного развития наблюдается угнетение процесса митотического деления кардиомиоцитов как предсердий, так и желудочка,

по сравнению с контролем. Содержание двуядерных кардиомиоцитов снижается в предсердиях в 1.2 раза, в желудочке – в 1.35 раза. У головастика 53 стадии развития наблюдается существенное уменьшение пролиферативной активности и увеличение доли двуядерных кардиомиоцитов по сравнению с животными контрольной группы. На заключительной, 54 стадии периода метаморфоза головастика в молодых лягушатах, в мазках изолированных клеток предсердий и желудочка не обнаруживаются митотически делящиеся сердечные мышечные клетки, при этом индекс двуядерных кардиомиоцитов остается достаточно высоким.

Во II серии эксперимента под действием ионов кадмия, содержащихся в среде обитания в концентрации 0,02 мг/л, у головастика 51 стадии личиночного развития отмечается снижение митотического индекса кардиомиоцитов в предсердиях в 0.12 раза, в желудочке – в 0.14 раза. При этом в желудочке индекс двуядерных кардиомиоцитов также уменьшается по сравнению с контролем, а в предсердиях наблюдается тенденция снижения содержания двуядерных сердечных мышечных клеток. У личинок 52 стадии развития пролиферативная активность сердечных мышечных клеток возрастает, но остается значительно меньше, чем у животных контрольной группы. Содержание двуядерных кардиомиоцитов в предсердиях увеличивается в 1.14 раза,

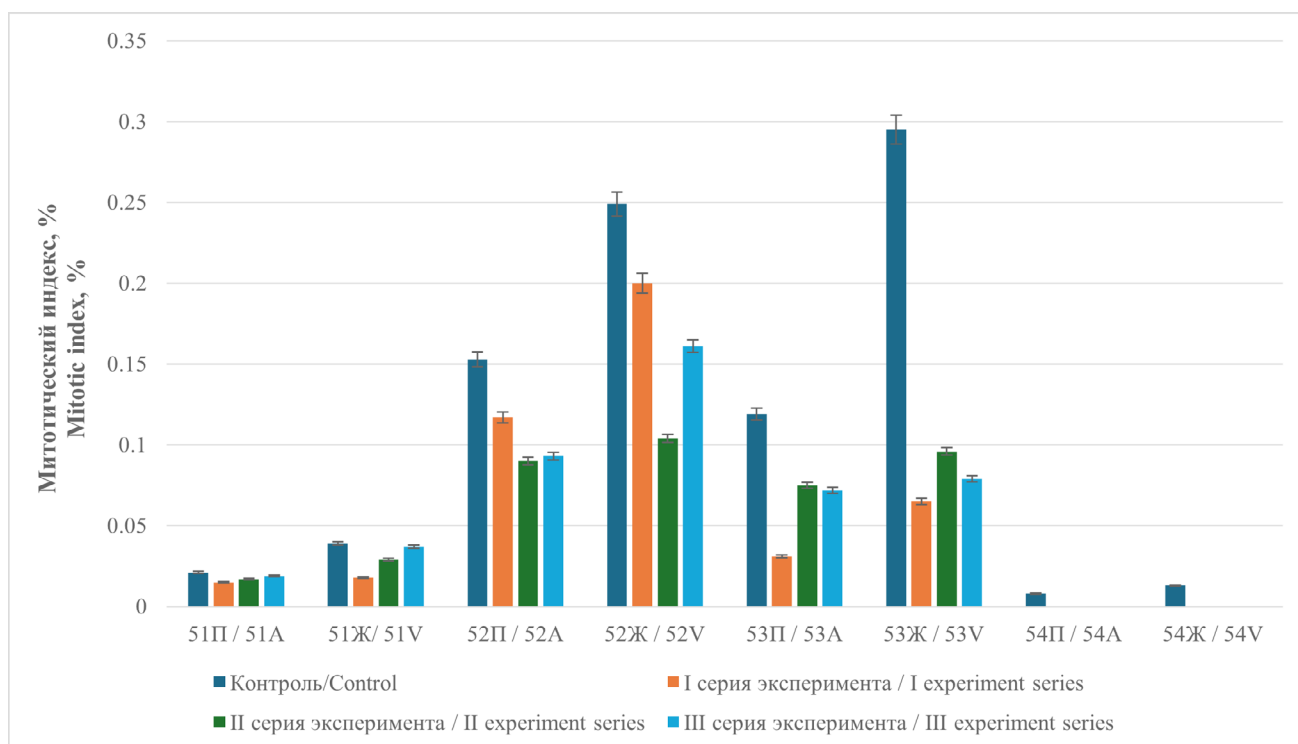


Рисунок 1. Изменение митотического индекса кардиомиоцитов озерной лягушки под влиянием ионов кадмия. 51-54 – стадии личиночного развития, П – предсердие, Ж – желудочек.

Figure 1. Changes in the mitotic index of lake frog cardiomyocytes under the effect of cadmium ions. 51-54 – larval development stages, A – atrium, V – ventricle.

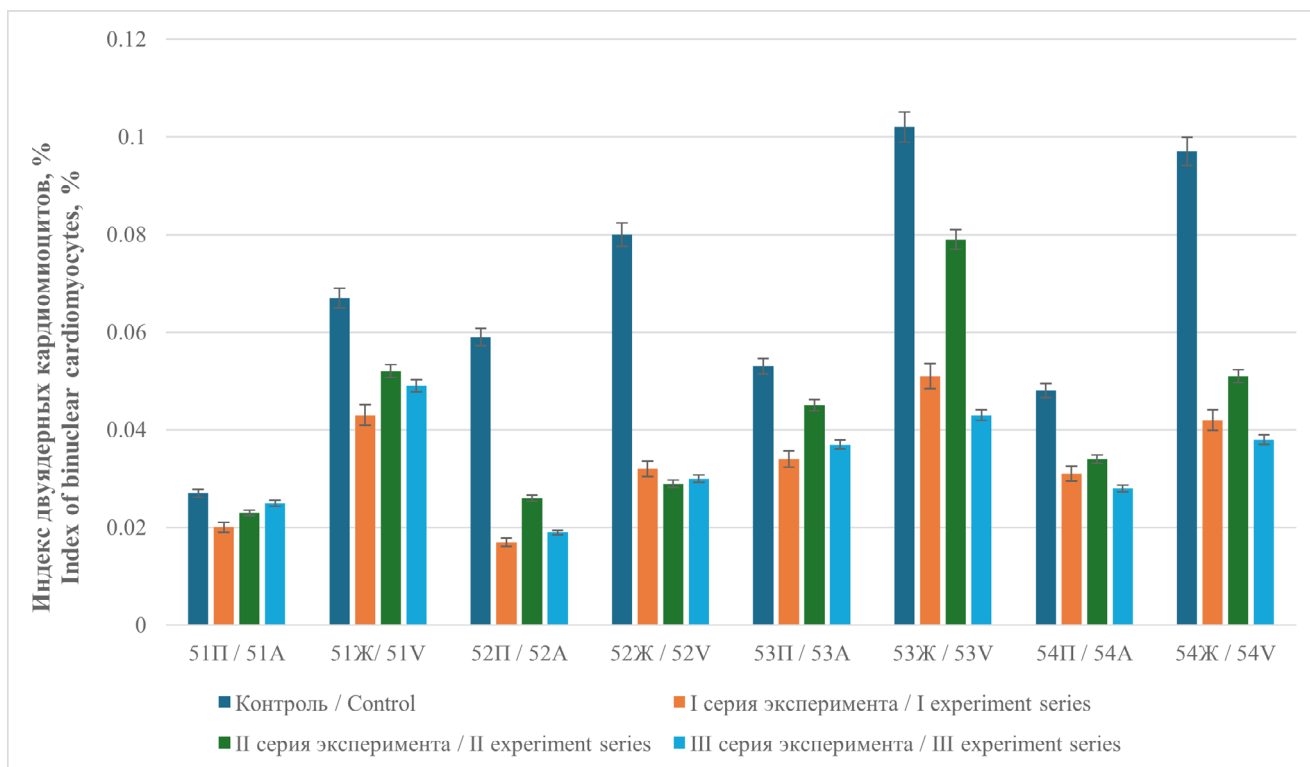


Рисунок 2. Изменение индекса двуядерных кардиомиоцитов озерной лягушки под влиянием ионов кадмия. 51-54 – стадии личиночного развития, П – предсердие, Ж – желудочек.

Figure 2. Changes in the index of binuclear cardiomyocytes of the lake frog under the effect of cadmium ions. 51-54 – larval development stages, A – atrium, V – ventricle.

а в желудочке уменьшается. На 53 стадии личиночного развития наблюдается тенденция снижения митотического индекса кардиомиоцитов желудочка и снижение пролиферативной активности кардиомиоцитов предсердий. При этом индекс двуядерных кардиомиоцитов увеличивается, но не превышает контрольных показателей. На 54 стадии личиночного развития наблюдается полное подавление пролиферативной активности сердечных мышечных клеток личинок озерной лягушки, при этом индекс двуядерных кардиомиоцитов уменьшается, но не превышает контрольных значений.

В III серия эксперимента при действии на организм головастика ионов кадмия в концентрации 0.1 мг/л на 51 стадии личиночного развития наблюдается тенденция снижения митотического индекса и индекса двуядерных кардиомиоцитов по сравнению с контролем. У личинок озерной лягушки 52 стадии развития происходит повышение пролиферативной активности кардиомиоцитов в предсердиях и в желудочке. При этом индекс двуядерных кардиомиоцитов снижается в предсердиях в 1.3 раза, а в желудочке – в 1.6 раза. На 53 стадии личиночного развития митотический индекс сердечных мышечных клеток озерной лягушки в предсердиях уменьшается менее интенсивно, чем в желудочке. При этом индекс двуядерных кардиомиоцитов увеличивается, но не превышает

контрольных показателей. На следующей стадии периода метаморфоза головастика в молодых лягушках в мазках изолированных клеток сердца озерной лягушки не обнаруживаются митотически делящиеся кардиомиоциты. При этом индекс двуядерных кардиомиоцитов предсердий и желудочка снижается.

В литературе описано несколько механизмов повреждения клеток и тканей, вызываемых ионами кадмия. Ионы кадмия воздействуют на белки, липиды и фосфолипиды клеточной мембраны [1, 9], а также на ДНК, изменяя факторы транскрипции, регуляцию и экспрессию их целевых генов [10, 11], Кадмий может вызывать окислительный стресс [2], способствуя накоплению митохондриальных активных форм кислорода, снижению мембранного потенциала митохондрий и увеличению ионной проницаемости во внутренней мембране, что в дальнейшем также приводит к апоптозу клеток [9].

Изменение протекания процесса пролиферации сердечных миоцитов озерной лягушки в период метаморфоза головастика, происходящих под действием различных концентраций ионов кадмия, вероятно, обусловлено нарушением синтеза или структурной организации белков цитоскелета, принимающих участие в формировании веретена деления и расхождении хромосом в анафазе митоза.

Выводы

Conclusions

Под влиянием на организм головастика озерной лягушки ионов кадмия в различных концентрациях, содержащихся в среде обитания личинок озерной лягушки, в период метаморfoза головастика в молодых лягушат наблюдается

угнетение пролиферативной активности сердечных мышечных клеток предсердий и желудочка на всех изученных стадиях развития, которое особенно заметно при воздействии на организм ионов кадмия в концентрации 0.02 мг/л. При этом наблюдается закономерное снижение индекса двуядерных кардиомиоцитов во всех отделах сердца.

Список источников

1. Matović V., Buha A., Đukić-Ćosić D., Bulat Z. Insight into the oxidative stress induced by lead and/or cadmium in blood, liver and kidneys. *Food and Chemical Toxicology*. 2015;78:130-140. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2015.02.011>
2. Li X., Zheng Y., Zhang G. et al. Cadmium induced cardiac toxicology in developing Japanese quail (*Coturnix japonica*): Histopathological damages, oxidative stress and myocardial muscle fiber formation disorder. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology*. 2021;250:109168. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2021.109168>
3. Dal-Medico S.E., Rissoli R.Z., Gamero F.U. et al. Negative impact of a cadmium concentration considered environmentally safe in Brazil on the cardiac performance of bullfrog tadpoles. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2014;104:168-174. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.03.003>
4. Руденко Е.Ю., Милютин М.В. Воздействие ионов кадмия на дифференцировку кардиомиоцитов озерной лягушки (*Pelophylax ridibundus*). *Международный научный сельскохозяйственный журнал*. 2025;(2):20-25.
5. Дунаев Е.А., Орлова В.Ф. *Земноводные и пресмыкающиеся России. Атлас-определитель*. Москва: Фитон, 2021:328.
6. Бакулина Э.Д., Баранов В.С., Белорусов Л.В. и др. *Объекты биологии развития*. Москва: Наука, 1975:579.
7. Бродский В.Я., Цирекидзе Н.Н., Коган М.Е. Изменение абсолютного числа клеток в сердце и печени. Количественное сохранение белков и ДНК в изолированных клетках. *Цитология*. 1983;(3):260-265.
8. Мавликеев М.О., Киясов А.П., Деев Р.В. и др. *Гистологическая техника в патоморфологической лаборатории*. Москва: Практическая медицина, 2023:112.
9. Genchi G., Sinicropi M.S., Lauria G. et al. The effects of cadmium toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;17(11):3782. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>
10. Tai Y.-T., Chou S.-H., Cheng C.-Y. et al. The preferential accumulation of cadmium ions among various tissues in mice. *Toxicology Reports*. 2022;9:111-119. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2022.01.002>

References

1. Matović V., Buha A., Đukić-Ćosić D., Bulat Z. Insight into the oxidative stress induced by lead and/or cadmium in blood, liver and kidneys. *Food and Chemical Toxicology*. 2015;78:130-140. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2015.02.011>
2. Li X., Zheng Y., Zhang G. et al. Cadmium induced cardiac toxicology in developing Japanese quail (*Coturnix japonica*): Histopathological damages, oxidative stress and myocardial muscle fiber formation disorder. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology*. 2021;250:109168. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2021.109168>
3. Dal-Medico S.E., Rissoli R.Z., Gamero F.U. et al. Negative impact of a cadmium concentration considered environmentally safe in Brazil on the cardiac performance of bullfrog tadpoles. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2014;104:168-174. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.03.003>
4. Rudenko E.Yu., Milyutin M.V. Effect of cadmium ions on differentiation of lacustrine frog (*Pelophylax ridibundus*) cardiomyocytes. *International Scientific Agricultural Journal*. 2025;(2):20-25. (In Russ.)
5. Dunaev E.A., Orlova V.F. *Amphibians and reptiles of Russia. Atlas-guide*. Moscow, Russia: Fiton, 2021:328. (In Russ.)
6. Bakulina E.D., Baranov V.S., Belorусov L.V. et al. *Objects of developmental biology*. Moscow, USSR: Nauka, 1975:579. (In Russ.)
7. Brodsky V.Ya., Tsirekidze N.N., Kogan M.E. Changes in the absolute number of cells in the heart and liver. Quantitative preservation of proteins and DNA in isolated cells. *Tsitologiya*. 1983;(3):260-265. (In Russ.)
8. Mavlikeev M.O., Kiyasov A.P., Deev R.V. et al. *Histological technique in the pathomorphological laboratory*. Moscow, Russia: Prakticheskaya meditsina, 2023:112. (In Russ.)
9. Genchi G., Sinicropi M.S., Lauria G. et al. The effects of cadmium toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;17(11):3782. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>
10. Tai Y.-T., Chou S.-H., Cheng C.-Y. et al. The preferential accumulation of cadmium ions among various tissues in mice. *Toxicology Reports*. 2022;9:111-119. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2022.01.002>

11. Tokumoto M., Lee J.-Y., Satoh M. Transcription factors and downstream genes in cadmium toxicity. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*. 2019;42(7):1083-1088.
<https://doi.org/10.1248/bpb.b19-00204>

Сведения об авторах

Елена Юрьевна Руденко, доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры морфологии ИАМ, ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России (Пироговский Университет); 117513, Россия, г. Москва, ул. Островитянова, 1, стр. 6; e_rudenko@rambler.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-2701-9225>

Максим Викторович Милютин, кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры анатомии человека медицинского факультета, Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ; 249039, Россия, Калужская область, г. Обнинск, Студгородок, 1; mv-syktyvkar@mail.ru;
<https://orcid.org/0009-0007-6539-9875>

Алиса Анатольевна Агаркова, кандидат сельскохозяйственных наук, ассистент кафедры морфологии и ветеринарно-санитарной экспертизы, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, Тимирязевская ул., 49; agarkova-vasilisa@mail.ru;
<https://orcid.org/0009-0003-2696-2320>

Турсумбай Сатымбаевич Кубатбеков, доктор биологических наук, профессор кафедры морфологии и ветеринарно-санитарной экспертизы, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, Тимирязевская ул., 49; tursumbai61@list.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-0911-9791>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.03.2026
Одобрена после рецензирования 30.03.2026
Принята к публикации 30.03.2026

11. Tokumoto M., Lee J.-Y., Satoh M. Transcription factors and downstream genes in cadmium toxicity. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*. 2019;42(7):1083-1088.
<https://doi.org/10.1248/bpb.b19-00204>

Information about the authors

Elena Yu. Rudenko, DSc (Bio), Associate Professor, Professor at the Department of Morphology of the Anatomy and Morphology Institute, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «N.I. Pirogov Russian National Research Medical University» of the Ministry of Health of the Russian Federation; 117513, Russian Federation, Moscow, Ostrovityanova St., 1, Bldg. 6; e_rudenko@rambler.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-2701-9225>

Maksim V. Milyutin, CSc (Med), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Human Anatomy of the Faculty of Medicine, Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Research Nuclear University “MEPhI”, 249039, Russian Federation, Kaluga Region, Obninsk, Studgorodok, 1; mv-syktyvkar@mail.ru;
<https://orcid.org/0009-0007-6539-9875>

Alisa A. Agarkova, CSc (Ag), Assistant at the Department of Morphology and Veterinary and Sanitary Expertise, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya St., 49; agarkova-vasilisa@mail.ru;
<https://orcid.org/0009-0003-2696-2320>

Tursumbai S. Kubatbekov, DSc (Bio), Professor at the Department of Morphology and Veterinary and Sanitary Expertise, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya St., 49; tursumbai61@list.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-0911-9791>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no relevant conflict of interests.

The article was submitted to the editorial office March 04, 2026
Approved after reviewing March 30, 2026
Accepted for publication March 30, 2026