

Минигалиева И.А.¹, Сутункова М.П.^{1,2}, Никогосян К.М.¹

Снижение негативного действия свинца на фоне физической нагрузки в субхроническом эксперименте

¹ФБУН «Екатеринбургский медицинский научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий» Роспотребнадзора, 620014, Екатеринбург, Россия;²ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России, 620028, Екатеринбург, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. Свинец является высокостребованным в мире металлом и связан с технологическим циклом на многих обогащательных, металлургических, машиностроительных предприятиях. Известно, что физическая нагрузка, с которой сопряжены условия труда в металлургическом производстве, может неоднозначно влиять на развитие интоксикации, в том числе усиливать её.

Цель исследования — научно обосновать и экспериментально апробировать на лабораторных животных биопрофилактический комплекс (БПК), предназначенный для повышения резистентности организма к умеренно выраженной свинцовой интоксикации на фоне умеренной физической нагрузки.

Материалы и методы. Свинцовая интоксикация моделировалась на аутбредных крысах-самцах путём внутрибрюшинного введения ацетата свинца в суммарной дозе 198 мг/кг массы тела в течение 6 нед. Контрольные животные получали физиологический раствор в таком же объёме. Физическая нагрузка моделировалась с помощью беговой дорожки для грызунов. Часть животных получала специальный БПК, в который входили следующие компоненты: энтеросорбент (пектин яблочный), мембраностабилизатор (глутаминовая кислота), антагонист свинца кальций в сочетании с витамином D₃, магний, калий, йод и некоторые антиоксиданты — омега-3 жирные кислоты, витамин C, рутин, ацетилцистеин и др.

Результаты. Физическая нагрузка сама по себе практически не изменяла изученные параметры, но усиливала токсические эффекты свинца при сочетанном действии: усугублялась анемия, увеличивалась доля патологически изменённых сперматозоидов, но не снижалась их жизнеспособность. На фоне биопрофилактики наблюдалось уменьшение выраженности упомянутых вредных эффектов.

Ограничения исследования. Исследование было ограничено использованием лабораторных животных одного пола и возраста.

Заключение. Разработанный биопрофилактический комплекс может служить вспомогательным инструментом, нацеленным на снижение рисков для здоровья лиц, чей профессиональный труд сопряжён с негативным воздействием соединений свинца и физической нагрузкой.

Ключевые слова: свинец; интоксикация; мышечные нагрузки; биопрофилактика; биопрофилактический комплекс

Соблюдение этических стандартов. Проведение эксперимента одобрено локальной комиссией по биоэтике ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора (протокол № 8 от 27.02.2020 г.).

Для цитирования: Минигалиева И.А., Сутункова М.П., Никогосян К.М. Снижение негативного действия свинца на фоне физической нагрузки в субхроническом эксперименте. *Гигиена и санитария*. 2025; 104(10): 1356–1362. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-10-1356-1362> <https://elibrary.ru/utncqd>

Для корреспонденции: Никогосян Карен Мерсопович, e-mail: nikoghosyankm@ymrc.ru

Участие авторов: Минигалиева И.А. — редактирование, обработка данных, написание текста; Сутункова М.П. — концепция и дизайн исследования; Никогосян К.М. — редактирование, сбор материала, написание текста. *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. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 17.06.2025 / Поступила после доработки: 17.07.2025 / Принята к печати: 15.10.2025 / Опубликовано: 14.11.2025

Ilzira A. Minigalieva¹, Marina P. Sutunkova^{1,2}, Karen M. Nikogosyan¹

Attenuation of adverse effects of lead exposure against background of the physical load in a subchronic experiment

¹Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, Yekaterinburg, 620014, Russian Federation;²Ural State Medical University, Yekaterinburg, 620028, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Occupational lead exposure poses danger due to large economic losses mainly associated with a decrease in working life expectancy. It is common knowledge that physical activity, which is inherent to working conditions in metallurgy, can affect poisoning in different ways, including enhancing it.

Objective. To substantiate and test a bioprophylactic complex (BPC) aimed at increasing the resistance of the organism to moderate lead intoxication combined with moderate physical activity in an animal experiment.

Materials and methods. Lead poisoning was modeled on outbred male rats by intraperitoneal administration of lead acetate to the exposure groups in a total dose of 198 mg/kg body weight during 6 weeks. Control animals received saline in a similar volume. Physical activity was modeled using a small rodent treadmill. Some animals were also administered a special BPC which included the following components: enterosorbent — apple pectin, membrane stabilizer — glutamic acid, lead antagonist calcium in combination with vitamin D₃, magnesium, potassium, iodine, and some antioxidants — Omega-3, vitamin C, rutin, acetylcysteine, and others.

Results. Physical exercise itself did not affect the parameters under study but aggravated toxic effects of lead when combined: anemia worsened and, the proportion of abnormal spermatozoa rose (without a decrease in their viability, however). Administration of the bioprophylactic complex mitigated the adverse effects mentioned above.

Limitations. The study was limited to using laboratory animals of the same sex and age.

Conclusion. The developed complex can serve as an auxiliary tool aimed at reducing health risks to individuals occupationally exposed to lead compounds and physical work.

Keywords: lead; poisoning; muscle loading; bioprophylaxis; bioprophylactic complex

Compliance with ethical standards. The experiment was approved by the local Bioethics Committee of the Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (protocol No.8 of 27.02.2020).

For citation: Minigalieva I.A., Sutunkova M.P., Nikogosyan K.M. Attenuation of adverse effects of lead exposure against background of the physical load in a subchronic experiment. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal.* 2025; 104(10): 1356–1362. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-10-1356-1362> <https://elibrary.ru/utncqd> (In Russ.)

For correspondence: Karen M. Nikogosyan, e-mail: nikoghosyankm@ymrc.ru

Contribution: Minigalieva I.A. — data analysis, draft manuscript preparation, editing; Sutunkova M.P. — study conception and design; Nikogosyan K.M. — data collection, draft manuscript preparation, editing. 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 study had no sponsorship.

Received: June 17, 2025 / Revised: July 17, 2025 / Accepted: October 15, 2025 / Published: November 14, 2025

Введение

Свинец (Pb) является высоковостребованным в мире металлом и связан с технологическим циклом на многих обогащательных, металлургических, машиностроительных предприятиях. Вместе с тем Pb выступает одним из самых распространённых поллютантов окружающей среды и производственных помещений. Различные соединения этого металла создают серьёзную угрозу для здоровья рабочих и населения, проживающего вблизи промышленных предприятий. Данные, опубликованные Роспотребнадзором в Государственном докладе «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения Российской Федерации в 2023 году», свидетельствуют о том, что комплексной химической нагрузке подвержена почти половина населения более 40 субъектов Российской Федерации, при этом наиболее существенный вклад в структуру нагрузки вносят именно условия труда рабочих [1].

В 2022–2023 гг., по данным Росстата, более трети трудоспособных мужчин так или иначе были задействованы на промышленных предприятиях либо условия труда этих лиц характеризовались воздействием химического фактора. На промышленных предприятиях труд большинства рабочих сопровождается не только воздействием вредных веществ, но и физическими нагрузками разной интенсивности. Полученные ранее экспериментальные данные свидетельствуют об усилении токсического эффекта тяжёлых металлов при сочетании с физической нагрузкой действия [2, 3]. Также научно доказано, что свинец в любых, даже самых малых, количествах угрожает здоровью человека, так как не является незаменимым микроэлементом и не выполняет биологических функций при физиологическом течении процессов¹. В 2019 г. воздействие свинцовых соединений на мировую человеческую популяцию стало причиной 30% идиопатических интеллектуальных расстройств, 4,6% болезней системы кровообращения и 3% хронических болезней почек, а также почти 1 млн смертей².

Воздействие свинца на взрослое трудоспособное население представляет опасность ввиду больших экономических потерь, снижения демографического потенциала и трудового долголетия рабочих. Согласно эпидемиологическим исследованиям, у людей, находившихся под воздействием свинца, наблюдались болезни головного мозга [4], сердца и сосудов [5], почек [7, 8], нарушение обмена веществ [6].

Предотвращение негативных эффектов вредного, в том числе сочетанного действия токсичных веществ и физической нагрузки является важной задачей в области профи-

лактической медицины. Однако не всегда предупредительные меры позволяют полностью исключить воздействие вредных веществ на организм рабочего. Для решения этой задачи коллектив ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП уже более 40 лет изучает особенности действия различных производственных поллютантов, разрабатывает и экспериментально апробирует меры биологической профилактики, направленные на повышение устойчивости организма к вредному действию факторов среды.

Цель работы — научно обосновать и экспериментально апробировать на лабораторных животных БПК, направленный на повышение резистентности организма к умеренно выраженной свинцовой интоксикации на фоне физической нагрузки средней степени.

Материалы и методы

Объектом исследования стали крысы-самцы, разделённые случайным образом на 6 групп по 10–15 особей в каждой (см. таблицу). Эксперимент одобрен локальной комиссией по биоэтике ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора (протокол № 8 от 27.02.2020 г.).

Масса тела крыс всех групп не имела существенных отличий — 250 ± 20 г. С целью контроля точных дозировок свинца и достижения субхронической интоксикации был выбран внутрибрюшинный путь введения раствора 3-водного ацетата свинца ($Pb(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$), ЧДА, ГОСТ 1027–67 (изготовитель ООО «НеваРеактив», Россия) в разовой дозе 11 мг/кг м. т. с частотой 3 раза в неделю на протяжении 6 нед. Крысы контрольной группы получали физиологический раствор с той же частотой введений и в том же объёме.

Моделирование физической нагрузки осуществлялось с помощью беговой дорожки для крыс TSE Treadmill System GmbH (TSE Systems International Group, Германия). На протяжении всего срока эксперимента крысы подвергались физической нагрузке по 10 мин в день при скорости 25 м/мин.

Все экспериментальные животные получали специализированный сбалансированный корм, а также питьевую воду первой категории качества (ТУ 11.07.11–006–06786053–2019). Параметры микроклимата не имели существенных колебаний и соответствовали комфортным и безопасным для лабораторных животных уровням (температура плюс 16–22 °C при относительной влажности воздуха 30–70%).

Экспериментальные животные групп № 4 и № 5 получали с кормом на протяжении всего эксперимента биопро-текторную комплексную добавку. Состав БПК подбирался с учётом специфических и неспецифических механизмов действия свинцовых соединений, свойств отдельных компонентов БПК и их возможности усиливать эффекты друг друга. Из расчёта на одно животное были подобраны следующие компоненты:

- пектин яблочный (200 мг) — энтеросорбент;
- ацетилцистеин (30 мг) и глицин (12 мг) — предшествен-

¹ US CDC Advisory Committee on Childhood Lead Poisoning Prevention. CDC updates blood lead reference value to 3.5 µg/dL. Atlanta: US Centres for Disease Control and Prevention; 2021.

² WHO (2021): The public health impact of chemicals: knowns and unknowns. <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-HEP-ECH-EHD-21.01>

Экспериментальные группы лабораторных животных и воздействующие на них факторы

Experimental groups of laboratory animals and factors exposed to them

№ группы Group No.	Наименование группы Group name	Воздействующие факторы Exposures
1	Контроль / Control	Интактная группа / Intact group
2	ФН / PL	Физическая нагрузка / Physical load (PL)
3	Свинец / Lead	Раствор ацетата свинца — 11 мг/кг массы тела (м. т.) Lead acetate solution (11 mg/kg b. w.)
4	Свинец + ФН / Lead + PL	Раствор ацетата свинца (11 мг/кг м. т.) и физическая нагрузка Lead acetate solution (11 mg/kg b. w.) and physical exercise
5	Свинец + ФН + БПК Lead + PE + BPC	Раствор ацетата свинца (11 мг/кг м. т.), физическая нагрузка, приём БПК Lead acetate solution (11 mg/kg b. w.), physical exercise and bioprophylactic complex (BPC) administration
6	БПК / BPC	Приём БПК / BPC administration

ники трипептида глутатиона, повышающие устойчивость организма к прооксидантному и свободнорадикальному действию;

- омега-3 полиненасыщенные жирные кислоты (13,3 мг), селен (2 мкг), рутин и витамин С (по 1,4 мг) — антиоксиданты;
- кальций (160 мг) — антагонист свинца (160 мг);
- витамин D₃ (1,64 мкг) для лучшего усвоения кальция;
- магний (1,18 мг), калий (1,32 мг), йод (4 мкг) для восстановления ионного баланса и нормализации ион-зависимых физиологических процессов;
- раствор глютаминовой кислоты с питьевой водой — антиоксидант, мембраностабилизатор.

Уровень копропорфирина измерялся с помощью экстракции копропорфириногена из мочи в кислой среде эфиром с последующим переводом копропорфириногена в копропорфин йодом, реэкстракцией копропорфирина соляной кислотой и определением с помощью спектрофотометра разницы оптической плотности при трёх длинах волн (380; 430 и 402 нм). Уровень дельта-АЛК определялся по реакции образования пиррола с ацетилацетоном при нагревании с последующей спектрофотометрией окрашенного продукта реакции пиррола с реактивом Эрлиха [9]. Для изучения гематологических показателей использовали автоматический гематологический анализатор Mythic 18. Ретикулоциты подсчитывали на световом микроскопе на 1000 эритроцитов при суправитальной окраске мазка бриллиантовым крезиловым синим.

Для подсчёта патологических форм сперматозоидов были выполнены мазки: суспензии придатков семенников наносили на предметное стекло, распределяли равномерно

по поверхности, затем высушивали в течение 24 ч и окрашивали по Паппенгейму. Микроскопию относительного количества патологических форм на 200 сперматозоидов проводили при увеличении $\times 20$, $\times 40$ [10].

Статистическую значимость полученных данных оценивали по критерию Краскела — Уоллиса и *t*-критерия Стьюдента с поправкой на множественные сравнения и с учётом проверки выборки на нормальность распределения.

Результаты

Интенсивность, тяжесть мышечной нагрузки оценивали визуально по субъективному параметру переносимости животными заданной нагрузки, выраженной в отсутствии полного отказа от бега. В ходе эксперимента не было зафиксировано массового регулярного отказа от бега у подверженных воздействию крыс. В качестве объективного параметра оценивали уровень лактата и глюкозы в сыворотке крови (рис. 1).

Содержание глюкозы в крови животных снизилось в группах «Свинец» и «Свинец + ФН», что свидетельствует, по нашему мнению, о влиянии на данный параметр свинца, а не мышечной нагрузки. Практически одинаково снизился уровень лактата во всех экспериментальных группах, кроме группы, получавшей биопрофилактический комплекс.

При оценке параметров красной крови были обнаружены признаки анемии, представленные на рис. 2: на 28% снизилась концентрация гемоглобина в крови животных группы «Свинец» и на 22,6% — у животных группы «Свинец + ФН» по сравнению с группой контроля (см. рис. 2, а). Среднее содержание гемоглобина в эритроците снизилось по сравнению с контролем в группе «Свинец» на 6,4%, в группе «Сви-

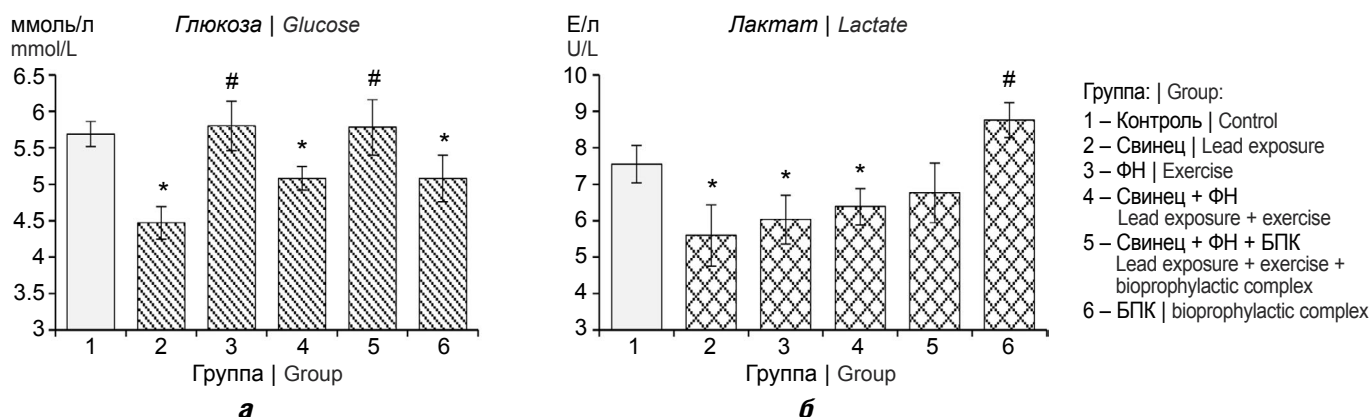


Рис. 1. Изменения параметров сыворотки крови животных при действии изученных факторов: а – уровень глюкозы, ммоль/л; б – уровень лактата, Е/Л. * – статистически значимая разница с группой контроля; # – статистически значимая разница с группой «Свинец + ФН».

Fig. 1. Changes in blood serum parameters in the experimental animals: а – glucose level, mmol/L; б – lactate level, U/L.

Statistically different from * the control group and # lead exposure + exercise group.

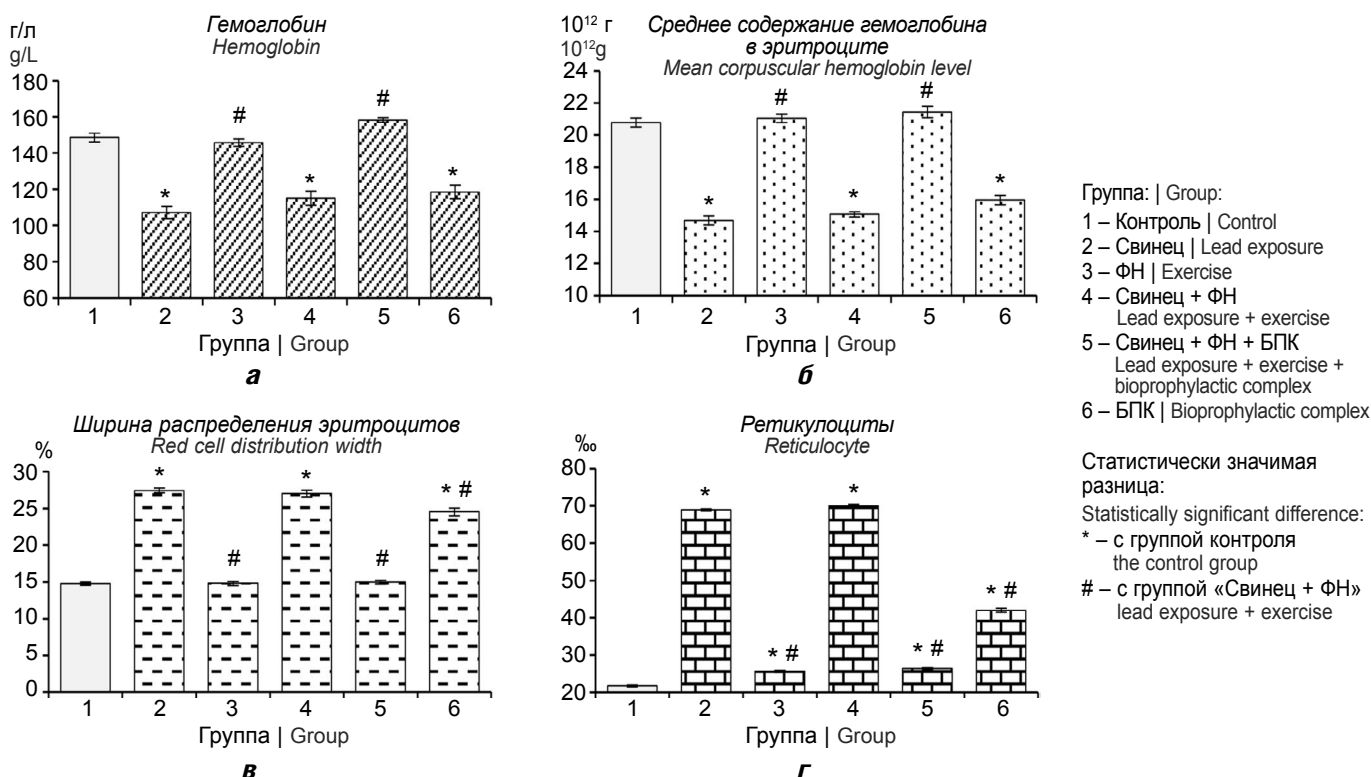


Рис. 2. Изменения параметров красной крови животных при действии изученных факторов: а – содержание гемоглобина, г/л; б – средняя концентрация гемоглобина в эритроците, г/л; в – ширина распределения эритроцитов, %; г – содержание ретикулоцитов в периферической крови, %.

Fig. 2. Changes in red blood cell parameters in the experimental animals: а – hemoglobin, g/L; б – mean corpuscular hemoglobin level, g/L; в – red cell distribution width, %; г – reticulocyte count, %.

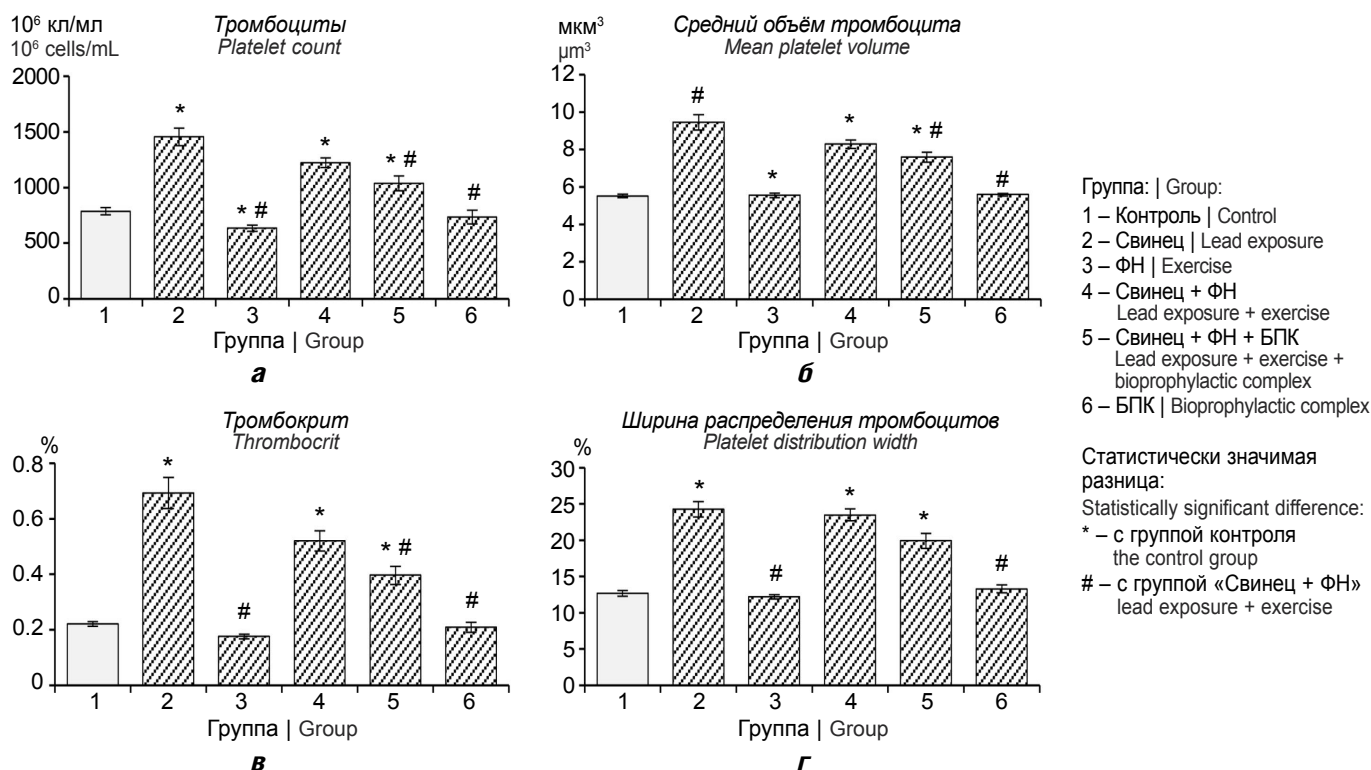


Рис. 3. Изменения параметров тромбоцитарного звена крови животных под воздействием изученных факторов: а – уровень тромбоцитов; 10⁶ кл/мл; б – средний объем тромбоцита, мкм³; в – тромбокрит, %; г – ширина распределения тромбоцитов, %.

Fig. 3. Changes in platelet indices of the experimental animals: а – platelet count, 10⁶ cells/mL; б – mean platelet volume, μm³; в – plateletcrit, %; г – platelet distribution width, %.

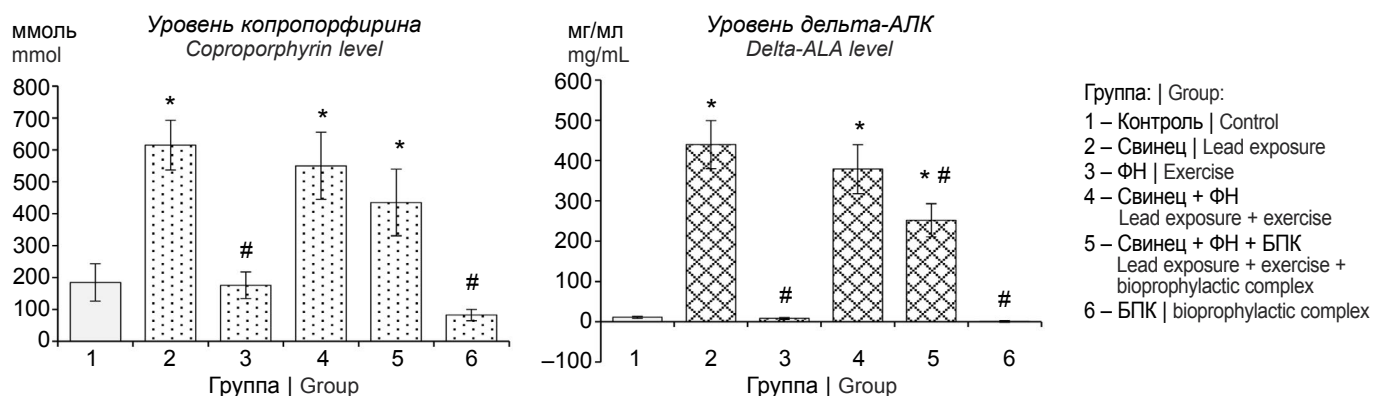


Рис. 4. Изменения параметров порфиринового обмена. * – статистически значимая разница с группой контроля; # – статистически значимая разница с группой «Свинец + ФН».

Fig. 4. Changes in porphyrin metabolism parameters. * – statistical difference from the control group; # – statistical difference from the group “Lead exposure + physical load”.

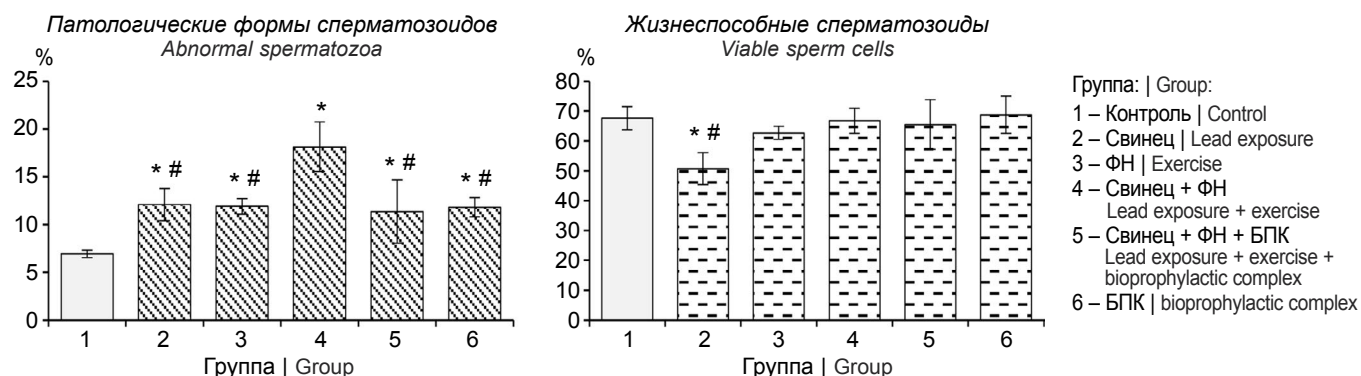


Рис. 5. Доли (%) патологических форм сперматозоидов (на 200 клеток) и жизнеспособных сперматозоидов (тест с эозином, на 200 клеток). * – статистически значимая разница с группой контроля; # – статистически значимая разница с группой «Свинец + ФН».

Fig. 5. The proportion of abnormal spermatozoa (per 200 cells), %, and the proportion of viable spermatozoa (eosin test, per 200 cells), %. * – statistically difference from the control group; # – statistically difference from “lead exposure + exercise” group.

нец + ФН» – на 4,2% (см. рис. 2, б). Увеличилась ширина распределения эритроцитов в группе «Свинец» на 46,2%, в группе «Свинец + ФН» – на 44,4% (см. рис. 2, в). Увеличилось содержание ретикулоцитов в группе, подвергшейся воздействию свинца изолированно, на 31,5%, и на 31,1% – на фоне мышечной нагрузки (см. рис. 2, г).

Показано изменение тромбоцитарного звена под воздействием свинца как изолированно, так и в сочетании с мышечной нагрузкой. При этом по определяемым показателям не усугубляла токсические эффекты ацетата свинца. В группе, получавшей БПК при воздействии свинца на фоне физической нагрузки, изученные показатели имеют тенденцию к снижению (рис. 3).

Мышечная нагрузка не влияла на порфириновый обмен, в то время как при свинцовой интоксикации (изолированной и в комбинации с физической нагрузкой) этот показатель существенно увеличился. Применение БПК позволило снизить содержание копропорфирина и дельта-АЛК в моче животных.

Результаты оценки параметров порфиринового обмена представлены на рис. 4.

Результаты подсчёта патологических форм сперматозоидов крыс продемонстрировали некоторые межгрупповые отличия (рис. 5). Так, в группе сочетанного действия свинца и ФН количество патологических форм сперматозоидов было существенно выше, чем в группах «Свинец» и «Контроль». В группе сочетанного действия, получавшей БПК, количество патологически изменённых форм значимо сни-

зилось по сравнению с группой «Свинец + ФН», что, вероятно, связано с повышением резистентности репродуктивной системы экспериментальных животных на фоне приёма БПК. Жизнеспособность клеток, определяемая по количеству живых, неокрашенных клеток в тесте с эозином, значимо снижалась только при изолированном воздействии свинца.

Обсуждение

При физической нагрузке лактат, образующийся в мышцах, поступает в кровь и утилизируется. По содержанию этого вещества можно косвенно судить о тяжести нагрузки, а причиной повышения уровня лактата в крови чаще всего является тканевая гипоксия, «кислородное голодание» клеток. Глюкоза обеспечивает клетки энергией. Результаты эксперимента показали, что заданные параметры на беговой дорожке для крыс переносились животными хорошо, а нагрузка не являлась истощающей.

Содержание глюкозы в крови животных снизилось только в группах «Свинец» и «Свинец + ФН», что свидетельствует, по нашему мнению, о влиянии на данный параметр свинца, а не физической нагрузки на беговой дорожке. Поскольку для функционирования головного мозга особенно важно достаточное количество глюкозы, уменьшение её содержания, обусловленное свинцовой интоксикацией, может также вносить некоторый вклад в нейротоксическое действие.

Анемия, характерный признак свинцовой интоксикации, выявлена по параметрам красной крови: снижению гемоглобина, цветовых показателей эритроцитов, появлению молодых форм эритроцитов во всех группах со свинцовой интоксикацией в изолированной и комбинированной формах. Механизм развития такой анемии связан, с одной стороны, с сокращением продолжительности жизни циркулирующих эритроцитов, который обусловлен ингибированием защитных систем, предохраняющих мембраны эритроцитов от перекисного окисления [11], а с другой — с нарушением синтеза гема [12].

На нарушение синтеза или повышенное разрушения гема, в состав которого наряду с железом входит и протопорфирин IX, может указывать накопление в организме продуктов порфиринового обмена. Дельта-аминолевулиновая кислота и копропорфирин являются известными показателями для оценки свинцовой интоксикации как у людей [13], так и в экспериментальных моделях *in vivo* [14]. На начальных этапах биосинтеза гема, когда после синтеза 5-аминолевулината переходит из митохондрий в цитоплазму, где две его молекулы конденсируются в порфобилиноген, необходимая для адекватного течения процесса порфобилиноген-синтаза может быть ингибирована ионами свинца [15]. В настоящем исследовании у животных групп «Свинец» и «Свинец + ФН» уровни этих метаболитов значимо не различались, что свидетельствует об отсутствии влияния мышечной работы на этот показатель в период субхронической интоксикации. Применение биопротекторного комплекса на фоне сочетанного действия свинца и мышечной нагрузки снижало уровень дельта-АЛК и копропорфирина, хотя и статистически незначимо. Вероятно, больший вклад в это снижение вносит энтеросорбент пектин, механически выводящий свинец из организма, и антагонист свинца кальций, способствующий уменьшению всасывания Рв.

Одним из признаков свинцовой интоксикации является изменение показателей тромбоцитарного звена крови [16, 17], выявленное и в настоящем исследовании (см. рис. 3). В совокупности указанные изменения свидетельствуют об увеличении тромбоцитарной массы в объёме крови и её гетерогенности. Активация тромбоцитарного звена гемостаза может происходить в ответ на прямое повреждающее действие свинца как на клетки крови, так на клетки органов-мишеней. Повышение общего количества тромбоцитов и тромбокриты может свидетельствовать о мобилизации тромбоцитов в зону повреждения свинцом и начале воспалительной реакции. По увеличению среднего объёма тромбоцитов и ширине распределения тромбоцитов можно судить об участии в этом процессе более молодых форм тромбоцитов. Максимально выраженные изменения мы наблюдали в группах «Свинец» и «Свинец + ФН», чуть менее выраженные — в группе «Свинец + ФН + БПК». Такая перестройка свидетельствует о воспалительной реакции, сопровождающей свинцовую интоксикацию [18]. Вероятно, тромбоцитоз является вторичным на фоне приёма БПК, при этом результаты продемонстрировали снижение данного показателя до близких к контрольным уровням.

Увеличение количества патологических форм сперматозоидов в группе «Свинец + ФН» связано с вредным действием свинца на репродуктивную систему самцов, реализуемым посредством нарушения ионного обмена в клетке и окислительного стресса. Аналогичные изменения уже были описаны в научной литературе применительно к клеткам других органов и систем, однако подобный механизм реализуется, вероятно, и при воздействии свинца на половые клетки [19–21]. Применение антиоксидантных и антицитотоксических компонентов привело к уменьшению патологических форм сперматозоидов на фоне приёма БПК, что может указывать на повышение резистентности репродуктивной системы самцов к действию свинца.

Полученные данные демонстрируют защитное действие компонентов специально разработанного БПК на организм крыс, экспонированных ацетатом свинца на фоне физической нагрузки. В частности, такой эффект достигается за счёт цитопротекторных свойств глутамата, цистеина и глицина, которые стабилизируют мембрану клетки и повышают её устойчивость к окислительному стрессу [16]. Полиненасыщенные жирные кислоты класса омега-3 улучшают усвояемость жирорастворимых витаминов и являются необходимыми субстратами для синтеза клеточных мембран [22, 23] при восстановлении уже повреждённых клеточных элементов. Витамин С и рутин обладают выраженными антиоксидантными свойствами [24, 25]. Кальций в сочетании с витамином D₃ препятствует всасыванию свинцовых соединений через желудочно-кишечный тракт [26].

Часть свинца, циркулирующего в крови, выводится с мочой, другая часть, особенно в виде соединений, достигает печени, где связывается с желчью, а затем вместе с ней попадает в двенадцатиперстную кишку через желчные протоки [27]. Пектин, являющийся по своей природе растворимой формой пищевых волокон, способен связывать свинец в полости кишечника, образуя хелатные комплексы, и выводить их с каловыми массами из организма [28, 29]. Таким образом, пектин предотвращает повторное всасывание свинца в кишечнике и оказывает протекторный эффект.

Заключение

У экспонированных животных нами выявлены анемия, нарушение порфиринового обмена, изменение тромбоцитарного пула крови, токсическое действие на репродуктивную систему. Физическая нагрузка сама по себе практически не изменяла исследуемые параметры, но усиливала токсический эффект свинца при сочетанном действии: усугублялась анемия, увеличивалась доля патологически изменённых сперматозоидов.

Апробированный в эксперименте *in vivo* биопротекторный комплекс может быть рекомендован для дальнейших испытаний в контролируемом курсе на соответствующем контингенте. БПК может служить вспомогательным инструментом снижения рисков для здоровья лиц, чей профессиональный труд сопряжён с воздействием соединений свинца и мышечной нагрузкой.

Литература

(п.п. 4–8, 12, 15–21, 23–28 см. References)

1. Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2022 году». М.; 2023.
2. Клинова С.В., Минигалиева И.А., Сутункова М.П., Шабардина Л.В. Интегральные показатели кардиотоксичности свинца и кадмия на фоне физической нагрузки. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(11): 1228–35. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-11-1228-1235> <https://elibrary.ru/nunamk>
3. Шабардина Л.В., Рябова Ю.В., Клинова С.В., Сутункова Ю.М. Влияние сочетанного действия кадмия и физической нагрузки на гематологические показатели крови крыс. *Актуальные вопросы современной медицинской науки и здравоохранения: сборник статей VIII Междуна-*
4. *родной научно-практической конференции молодых учёных и студентов*. Екатеринбург; 2023: 956–62.
5. Кацнельсон Б.А., Привалова Л.И., Гурвич В.Б., Кузьмин С.В., Киреева Е.П., Минигалиева И.А. и др. О роли биопротектики в системе мер управления профессиональными и экологически обусловленными химическими рисками для здоровья населения. *Токсикологический вестник*. 2015; (1): 10–21. <https://elibrary.ru/lbmspr>
6. Рябова Ю.В., Клинова С.В., Чернышов И.Н. Положительный эффект биопротектики по показателю сперматогенеза крыс при субхронической интоксикации наночастицами оксидов свинца и кадмия. *Медицина труда и экология человека*. 2019; (4): 59–67. <https://elibrary.ru/wyjwao>

11. Рябова Ю.В., Никогосян К.М., Батенева В.А. Способы повышения резистентности клетки к цитотоксическому действию факторов производственной среды и среды обитания как основа профилактических воздействий. В кн.: *Медицинская наука: вчера, сегодня, завтра: Сборник статей и тезисов*. М.: Тритон; 2024.
13. Шушкевич Н.И. Влияние свинца на изменение показателей крови у рабочих свинцового производства. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2007; (1): 49–53. <https://elibrary.ru/ijeycr>
14. Киреева Е.П., Кацнельсон Б.А., Дегтярева Т.Д., Привалова Л.И., Валамина И.Е., Береснева О.Ю. и др. Нефротокенческое действие свинца, кадмия и его торможение комплексом биопротекторов. *Токсикологический вестник*. 2006; (3): 26–32. <https://elibrary.ru/htvild>
22. Китикова Н.В., Половинкин Л.В., Ушков А.А., Шишкова И.Л., Ратько А.И., Половинкина Т.И. и др. Корригирующее действие препаратов фосфатов кальция при экспериментальной свинцовой интоксикации. *Токсикологический вестник*. 2006; (1): 12–6. <https://elibrary.ru/wdsfyl>
29. Кацнельсон Б.А., Дегтярева Т.Д., Привалова Л.И. *Принципы биологической профилактики профессиональной и экологически обусловленной патологии от воздействия неорганических веществ*. Екатеринбург; 1999.

References

1. State report «On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population in the Russian Federation in 2022». Moscow; 2023. (in Russian)
2. Klinova S.V., Minigalieva I.A., Sutunkova M.P., Shabardina L.V. Integral indicators of cardiotoxicity of lead and cadmium on the background of physical activity. *Gigiena i Sanitariia (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(11): 1228–35. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-11-1228-1235> <https://elibrary.ru/nunamk> (in Russian)
3. Shabardina L.V., Ryabova Yu.V., Klinova S.V., Sutunkova Yu.M. Effects of combined action of cadmium and physical load on the hematological blood parameters of rats. In: *Current Issues of Modern Medical Science and Healthcare: Collection of Articles of the VIII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students [Aktual'nye voprosy sovremennoi meditsinskoi nauki i zdoravookhraneniya: sbornik statei VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchennykh i studentov]*. Ekaterinburg; 2023: 956–62. (in Russian)
4. Beckwith T.J., Dietrich K.N., Wright J.P., Altaye M., Cecil K.M. Reduced regional volumes associated with total psychopathy scores in an adult population with childhood lead exposure. *Neurotoxicology*. 2018; 67: 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2018.04.004>
5. Chen Z., Huo X., Zhang S., Cheng Z., Huang Y., Xu X. Relations of blood lead levels to echocardiographic left ventricular structure and function in preschool children. *Chemosphere*. 2021; 268: 128793. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128793>
6. Baranowska-Bosiacka I., Kosińska I., Jamioł D., Gutowska I., Prokopowicz A., Rebczak-Marion E., et al. Environmental lead (Pb) exposure versus fatty acid content in blood and the mother and in the blood of newborn children. *Biol. Trace Elem. Res.* 2016; 170(2): 279–87. <https://doi.org/10.1007/s12011-015-0482-5>
7. Fadrowski J.J., Abraham A.G., Navas-Acien A., Gualler E., Weaver V.M., Furth S.L. Blood lead level and measured glomerular filtration rate in children with chronic kidney disease. *Environ. Health Perspect.* 2013; 121(8): 965–70. <https://doi.org/10.1289/ehp.1205164>
8. Goldstein S.L. Acute kidney injury in children and its potential consequences in adulthood. *Blood Purif.* 2012; 33(1–3): 131–7. <https://doi.org/10.1159/000334143>
9. Katsnelson B.A., Privalova L.I., Gurvich V.B., Kuzmin S.V., Kireyeva E.P., Minigalieva I.A., et al. The role of bio-prevention in the framework of managing occupational and environmental chemical risks to population health. *Toksikologicheskii vestnik*. 2015; (1): 10–21. <https://elibrary.ru/lbmspr> (in Russian)
10. Ryabova Yu.V., Klinova S.V., Chernyshov I.N. Positive effect of bioprophylaxis in terms of rat spermatogenesis during subchronic intoxication with lead and cadmium oxides by nanoparticles. *Meditsina truda i ekologiya cheloveka* 2019; (4): 59–67. <https://elibrary.ru/wjyiwao> (in Russian)
11. Ryabova Yu.V., Nikogosyan K.M., Bateneva V.A. Methods of increasing cell resistance to the cytotoxic effects of factors in the production environment and habitat as the basis for preventive effects. In: *Collection of Articles and Theses. Medical Science: Yesterday, Today, Tomorrow [Sbornik statei i tezisov. Meditsinskaya nauka: vchera, segodnya, zavtra]*. Moscow: Triton; 2024. (in Russian)
12. Wani A.L., Ara A., Usmani J.A. Lead toxicity: a review. *Interdiscip. Toxicol.* 2015; 8(2): 55–64. <https://doi.org/10.1515/intox-2015-0009>
13. Schuschkevich N.I. Impact of the lead on the blood parameters of the workers leaden production. *Vestnik Rossiiskogo universiteta družby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti*. 2007; (1): 49–53. <https://elibrary.ru/ijeycr> (in Russian)
14. Kireyeva Ye.P., Kalsnelson B.A., Degtyarova T.D., Privalova L.I., Valamina L.Ye., Beresneva O.Yu., et al. Nephrotoxic effect posed by lead and cadmium and its inhibition by a complex of bioprotective agents. *Toksikologicheskii vestnik*. 2006; (3): 26–32. <https://elibrary.ru/htvild> (in Russian)
15. Jaffe E.K., Martins J., Li J., Kervin R.L. Jr. The molecular mechanism of lead inhibition of human uroporphobilinogen synthase. *J. Biol. Chem.* 2001; 276(2): 1531–7. <https://doi.org/10.1074/jbc.M007663200>
16. Al Momen A. Thrombocytosis secondary to chronic lead poisoning. *Platelets*. 2010; 21(4): 297–9. <https://doi.org/10.3109/09537101003612813>
17. Protsenko Y.L., Katsnelson B.A., Klinova S.V., Lookin O.N., Balakin A.A., Nikitina L.V., et al. Effects of subchronic lead intoxication of rats on the myocardium contractility. *Food Chem. Toxicol.* 2018; 120: 378–89. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.07.034>
18. Metyka E., Chibowska K., Gutowska I., Falkowska A., Kupnicka P., Barczak K., et al. Lead (Pb) exposure enhances expression of factors associated with inflammation. *Int. J. Mol. Sci.* 2018; 19(6): 1813. <https://doi.org/10.3390/ijms19061813>
19. Gorkhali R., Huang K., Kirberger M., Yang J.J. Defining potential roles of Pb(2+) in neurotoxicity from a calcimimetics approach. *Metallomics*. 2016; 8(6): 563–78. <https://doi.org/10.1039/c6mt00038j>
20. Gavazzo P., Zanardi I., Baranowska-Bosiacka I., Marchetti C. Molecular determinants of Pb2+ interaction with NMDA receptor channels. *Neurochem. Int.* 2008; 52(1–2): 329–37. <https://doi.org/10.1016/j.neuint.2007.07.003>
21. Bitto E., Bingman C.A., Wesenberg G.E., McCoy J.G., Phillips G.N. Jr. Structure of pyrimidine 5'-nucleotidase type I. Insight into mechanism of action and inhibition during lead poisoning. *J. Biol. Chem.* 2006; 281(29): 20521–9. <https://doi.org/10.1074/jbc.M602000200>
22. Kitikova N.V., Polovinkin L.V., Ushkov A.A., Shishkova I.L., Rat'ko A.I., Polovinkina T.I., et al. Corrective effect of drugs calcium phosphates during experimental lead intoxication. *Toksikologicheskii vestnik*. 2006; (1): 12–6. <https://elibrary.ru/wdsfyl> (in Russian)
23. Skoczynska A., Wojakowska A., Nowacki D., Bobak L., Turczyn B., Smyk B., et al. Unsaturated fatty acids supplementation reduces blood lead level in rats. *Biomed. Res. Int.* 2015; 2015: 189190. <https://doi.org/10.1155/2015/189190>
24. Cao X.J., Cao J.J., Chen T.T., Chen W.H., Ruan D.Y. Protective effects of omega-3 fish oil on lead-induced impairment of long-term potentiation in rat dentate gyrus in vivo. *Sheng Li Xue Bao*. 2010; 62(3): 225–30.
25. Ahmad F., Liu P. (Ascorbyl) Pb neurotoxicity in the developing brain. *Antioxidants (Basel)*. 2020; 9(12): 1311. <https://doi.org/10.3390/antiox9121311>
26. Sutunkova M.P., Minigalieva I.A., Panov V.G., Riabova I.V., Privalova L.I., Katsnelson B.A., et al. Multisystemic damage to mitochondrial ultrastructure as an integral measure of the comparative in vivo cytotoxicity of metallic nanoparticles. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020; 918. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/918/1/012119> <https://elibrary.ru/wnacmp>
27. Alexander J., Aaseth J., Mikalsen A. Excretion of lead in rat bile – the role of glutathione. *Acta Pharmacol. Toxicol. (Copenh)*. 1986; 59(Suppl. 7): 486–9. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0773.1986.tb02809.x>
28. Ahmad F., Haque S., Ravinayagam V., Ahmad A., Kamli M.R., Barreto G.E., et al. Developmental lead (Pb)-induced deficits in redox and bioenergetic status of cerebellar synapses are ameliorated by ascorbate supplementation. *Toxicology*. 2020; 440: 152492. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2020.152492>
29. Katsnelson B.A., Degtyarova T.D., Privalova L.I. *Principles of Biological Prevention of Occupational and Environmentally Caused Pathologies from Exposure to Inorganic Substances [Printsipy biologicheskoi profilaktiki professional'noi i ekologicheskoi obuslovlennoi patologii ot vozdeystviya neorganicheskikh veshchestv]*. Ekaterinburg; 1999. (in Russian)

Сведения об авторах

Минигалиева Ильзира Амировна, доктор биол. наук, зав. отд. токсикологии и биопрофилактики ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора, 620014, Екатеринбург, Россия. E-mail: ilzira@ymrc.ru

Сутункова Марина Петровна, доктор мед. наук, директор ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора, 620014, Екатеринбург, Россия. E-mail: sutunkova@ymrc.ru

Никогосян Карен Мерсович, мл. науч. сотр. отд. токсикологии и биопрофилактики ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора, 620014, Екатеринбург, Россия. E-mail: nikoghosyankm@ymrc.ru

Information about the authors

Ilzira A. Minigalieva, DSc (Biology), head, Department of toxicology and bioprophylaxis, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, Yekaterinburg, 620014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-1871-8593> E-mail: ilzira@ymrc.ru

Marina P. Sutunkova, DSc (Medicine), director, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, Yekaterinburg, 620014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-1743-7642> E-mail: sutunkova@ymrc.ru

Karen M. Nikogosyan, junior researcher, Department of toxicology and bioprophylaxis, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, Yekaterinburg, 620014, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0003-0780-5733> E-mail: nikoghosyankm@ymrc.ru