



Научная статья
УДК 599.323.45:[612.59+591.111.1]
DOI: 10.37482/2687-1491-Z274

Реакция эритроцитов у крыс на водно-холодовую среду в зависимости от уровня физической нагрузки

Николай Петрович Монгалёв* ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2817-5780>

Надежда Алексеевна Вахнина* ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0779-5171>

Евгений Рафаилович Бойко* ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8027-898X>

*Институт физиологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук
(Сыктывкар, Россия)

Аннотация. Система крови – одна из наиболее реактивных систем, реагирующая на различные воздействия внутренней и внешней среды. Авторы настоящего исследования предположили, что ступенчатый плавательный тренинг может способствовать нормализации изменений клеточного состава красной крови животных и использоваться для запуска компенсаторно-восстановительного механизма, обеспечивающего повышение физической работоспособности организма. **Цель работы** – изучить влияние умеренной водно-холодовой среды на характер адаптационных изменений клеток красной крови у самцов крыс после сидения, свободного плавания и ступенчатого плавательного теста «до отказа» с грузом, составляющим 4 % от массы тела. **Материалы и методы.** Исследование проведено на половозрелых самцах крыс линии Wistar, разделенных случайным образом на одну контрольную и три экспериментальные (особи, сидевшие в холодной воде по 4 мин в день в течение 8 нед., одноразово плававшие в холодной воде свободными от груза и плававшие в ней с грузом при ступенчатом увеличении его массы от 0 до 4 % с последующим тестом «до отказа») группы. Сравнивалось морфофункциональное состояние красной крови крыс. **Результаты.** Установлено, что в крови крыс, сидевших в холодной воде, повышение гематокрита, уровня гемоглобина и количества эритроцитов сочеталось с гемоконцентрацией в отличие от животных, плававших в холодной воде. Показана значимая ретикулоцитарная реакция на холодное воздействие у крыс с нормированным плаванием, свободных от груза. Напротив, у животных, сидевших в холодной воде или плававших с грузом, такая реакция отсутствовала, что может рассматриваться в качестве ценного свидетельства регуляции морфофункционального состояния крови, направленной в конечном итоге на долгосрочную адаптацию организма. Наличие значимой отрицательной корреляционной связи между количеством ретикулоцитов и эритроцитов только у крыс, плававших в холодной воде без груза, может быть следствием проявления скрытого механизма регуляции эритроцитарного пула крови.

© Монгалёв Н.П., Вахнина Н.А., Бойко Е.Р., 2026

Ответственный за переписку: Николай Петрович Монгалёв, *адрес:* 167982, г. Сыктывкар, ГСП-2, ул. Первомайская, д. 50; *e-mail:* mongalev@physiol.komisc.ru

Ключевые слова: адаптационные изменения красной крови, гематокрит, гемоконцентрация, эритроциты, ретикулоциты, физическая нагрузка, холодовая среда, водно-иммерсионная гипотермия

Финансирование. Исследование проведено в рамках темы научно-исследовательской работы Института физиологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук «Физиолого-биохимические механизмы устойчивости организма человека и животных к факторам Севера и физическим нагрузкам, способы ее повышения и прогностической оценки», FUUU-2022-0063 (регистрационный № 1021051201877-3).

Для цитирования: Монгалёв, Н. П. Реакция эритроцитов у крыс на водно-холодовую среду в зависимости от уровня физической нагрузки / Н. П. Монгалёв, Н. А. Вахнина, Е. Р. Бойко // Журнал медико-биологических исследований. – 2026. – Т. 14, № 1. – С. 35-42. – DOI 10.37482/2687-1491-Z274.

Original article

Response of Erythrocytes in Rats to a Cold Water Environment Depending on the Level of Physical Activity

Nikolay P. Mongalev* ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2817-5780>
Nadezhda A. Vakhnina* ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0779-5171>
Evgeny R. Boyko* ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8027-898X>

*Institute of Physiology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Syktyvkar, Russia)

Abstract. The circulatory system is one of the most reactive systems, responding to various internal and external environmental factors. The authors of this study hypothesized that graded swimming training could help to normalize the composition of red blood cells in animals and be used to trigger a compensatory and restorative mechanism that enhances physical performance. The **purpose** of the article was to investigate the effect of a moderate cold water environment on the nature of adaptive changes in red blood cells in male rats after sitting, free swimming and a graded swimming test to failure with a load of 4 % of their body weight. **Materials and methods.** The study involved sexually mature male Wistar rats, randomly divided into one control and three experimental (animals that sat in the water for 4 min a day during 8 weeks, those that swam once without a weight, and those that swam with a gradually increasing load from 0 to 4 % and a subsequent test to failure) groups. The morphofunctional state of red blood cells in rats was compared. **Results.** We found that in the blood of rats that sat in the cold water, an increase in haematocrit, haemoglobin and erythrocyte count was combined with haemoconcentration, in contrast to the animals that swam in the cold water. A significant reticulocyte response to cold exposure was observed in rats that swam without a weight. Conversely, animals that sat in the cold water or swam with a load showed no such response, which can be considered as a valuable indicator of the regulation of the morphofunctional state of the blood, ultimately aimed at long-term adaptation of the body. The significant negative correlation between reticulocyte and erythrocyte counts only in rats that swam in the cold water without a weight may indicate a hidden mechanism of regulation of the erythrocyte pool in the blood.

Corresponding author: Nikolay Mongalev, address: ul. Pervomayskaya 50, GSP-2, Syktyvkar, 167982, Russia; e-mail: mongalev@physiol.komisc.ru

Keywords: *adaptive changes in red blood cells, haematocrit, haemoconcentration, erythrocytes, reticulocytes, physical activity, cold environment, water immersion hypothermia*

Funding. The study was conducted within the framework of the research of the Institute of Physiology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences on the following topic: “Physiological and Biochemical Mechanisms of Resistance of the Human and Animal Body to Northern Factors and Physical Exertion, Methods for Increasing It and Prognostic Assessment”, FUUU-2022-0063 (registration no. 1021051201877-3).

For citation: Mongalev N.P., Vakhnina N.A., Boyko E.R. Response of Erythrocytes in Rats to a Cold Water Environment Depending on the Level of Physical Activity. *Journal of Medical and Biological Research*, 2026, vol. 14, no. 1, pp. 35–42. DOI: 10.37482/2687-1491-Z274

Водно-иммерсионная гипотермия связана с потерей тепла организмом, сопровождается периферической вазоконстрикцией [1], централизацией кровотока и гемоконцентрацией [2]. В отличие от гемоконцентрации в условиях гипотермии, повышение гематокрита, содержания гемоглобина [3], количества эритроцитов и ретикулоцитов [4, 5] вследствие физической нагрузки способствует адекватному возрастанию функциональной устойчивости красной крови, что необходимо для экстренного восполнения дефицита кислорода [6, 7]. В то же время максимальная физическая нагрузка у спортсменов может сопровождаться повышением гематокрита без ретикулоцитоза [8].

Интегративные изменения морфофункционального состояния красной крови в качестве проявления компенсаторно-приспособительных реакций организма в условиях сочетания водно-иммерсионной холодной среды и физической нагрузки изучены недостаточно. Считается, что совместное использование этих факторов у человека и животных может быть эффективным только при определенных условиях [9], поскольку приводит к развитию «перекрестной адаптации» [10].

Цель работы – изучить влияние водно-иммерсионной холодной среды на характер адаптационных изменений клеток красной крови у крыс после сидения, свободного плавания и ступенчатого плавательного теста «до отказа» с грузом, составляющим 4 % от массы тела.

Материалы и методы. Исследование проводили на половозрелых самцах крыс линии Wistar. Животных содержали по 4 особи в клет-

ке на стандартном рационе вивария, со свободным доступом к воде, при температуре 21 ± 1 °C и 12-часовом освещении.

В контрольную группу были включены животные, не подвергавшиеся холодному воздействию ($n = 10$). Также были выделены три экспериментальные группы крыс: сидевшие в холодной воде ($n = 8$) – адаптация к десатурированной воде температурой 10–12 °C осуществлялась при увеличении времени сидения от 2 до 4 мин в течение первых 5 дней с последующим тестированием по 4 мин в течение 8 нед.; плававшие в холодной воде без груза ($n = 8$) – плавали однократно в течение 4 мин в воде температурой 10–12 °C; плававшие в холодной воде с грузом ($n = 10$) – адаптация к плаванию начиналась в условиях эксперимента, в ходе которого время нахождения крыс в воде температурой 10–12 °C в непрозрачной емкости глубиной 60 см в течение первых 5 дней постепенно увеличивалось от 2 до 4 мин без груза, после чего животные подвергались нагрузочному тестированию согласно методу [11] с модификациями, заключающимися в постепенном увеличении массы груза с 0 до 4 % массы тела и последующем выполнении плавательного теста «до отказа». После проведения всех манипуляций животных декапитировали под легким наркозом в соответствии с правилами Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях (ETS № 123). Протокол исследования рассмотрен и одобрен комитетом по биоэтике Института физиологии

Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук 15 ноября 2022 года.

В крови, стабилизированной гепарином (5000 ед./мл, АКООС, Россия), определяли уровень гемоглобина по Сали (ГС-3), гематокрит с использованием центрифуги MPW-310 (Mechanika Precyzyjna, Польша), количество эритроцитов в камере Горяева и ретикулоцитов на мазках после инкубирования крови в течение 12–15 мин с 1 %-м раствором бриллиантового крезилового синего. Измеряли диаметры 100 эритроцитов, окрашенных по Романовскому–Гимзе (набор фирмы Vital-Development, Россия), с помощью микроскопа PZO (Польша) с масляной иммерсией, увеличением объектива 100× и градуированной шкалой окуляра 12× [12].

Экспериментальные данные обрабатывали с помощью программы Statistica 8.0. Статистическую значимость различий клеточного состава красной крови у исследованных групп животных определяли с использованием критерия Манна–Уитни, учитывали средние значения показателей (M) и ошибки средних (m). Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$. Для установления связи между показателями рассчитывали коэффициент ранговой корреляции Спирмена (r_s) [13].

Результаты. У сидевших в холодной воде крыс отмечалось увеличение гематокрита, уровня гемоглобина, количества эритроцитов и снижение концентрации гемоглобина в эритроците по сравнению с контролем (см. таблицу).

Клеточный состав красной крови крыс в зависимости от уровня физической нагрузки и температурного фактора ($M \pm m$)

Composition of red blood cells in rats depending on the level of physical activity and temperature ($M \pm m$)

Показатель	Группа крыс			
	контрольная	сидевшая в холодной воде	плававшая в холодной воде	
			без груза	с грузом (4 % от массы тела)
Гематокрит, %	44,84±0,33	49,71±0,50***	47,93±1,44	51,51±0,43***▲
Уровень гемоглобина, г/л	144,9±1,22	155,0±1,03***	143,0±1,58***	159,0±2,32***▲▲
Эритроциты:				
количество, $10^{12}/л$	8,16±0,16	8,40±0,31*	8,29±0,14	9,18±0,28***▲
диаметр, мкм	6,18±0,02	6,21±0,04	6,12±0,03	6,31±0,04***▲
доля клеток диаметром 0–6,3 мкм, %	40,40±2,68	37,50±2,75	34,63±2,74	33,30±2,03
площадь, мкм ²	74,03±0,66	74,81±0,93	72,66±0,96	78,29±1,97▲
Содержание гемоглобина в эритроците, пг	17,79±0,31	18,62±0,69	17,27±0,13	17,52±0,49
Концентрация гемоглобина в эритроците, %	32,31±0,28	31,28±0,19**	29,96±0,64**	31,84±0,31▲
Количество ретикулоцитов:				
$10^{12}/л$	0,10±0,005	0,11±0,01	0,23±0,02***●●●	0,10±0,007▲▲▲
‰	12,61±0,65	13,45±1,05	28,19±2,87***●●●	10,78±0,59▲▲▲

Примечание. Отличия статистически значимы: *, **, *** – от контрольной группы при $p < 0,05$, $p < 0,01$ и $p < 0,001$ соответственно; ●, ●● – от группы, сидевшей в холодной воде, при $p < 0,05$ и $p < 0,001$ соответственно; ▲, ▲▲, ▲▲▲ – от группы, плававшей без груза, при $p < 0,05$, $p < 0,01$ и $p < 0,001$ соответственно.

Свободно плававшие в течение 4 мин животные характеризовались уменьшением концентрации гемоглобина в эритроците и повышением количества ретикулоцитов, тогда как по сравнению с ними плававшие в 2 раза больше по времени крысы с грузом, составлявшим 4 % от массы тела, имели более высокие значения гематокрита, уровня гемоглобина, количества и диаметра эритроцитов, площади поверхности эритроцитов, концентрации гемоглобина в эритроците при меньшем количестве ретикулоцитов.

Значимая корреляционная связь между количеством ретикулоцитов и эритроцитов обнаружена только у крыс, плававших без дополнительной нагрузки ($r_s = -0,786; p < 0,05$).

Обсуждение. У сидевших в холодной воде крыс изменения эритроцитарных параметров крови заключались в увеличении уровня гемоглобина, количества эритроцитов и особенно гематокрита, который в условиях гемоконцентрации может возрасти на 8,9 % [14], что, по-видимому, характеризует типичную картину воздействия холода, сопровождающегося вазоконстрикцией [1]. При этом снижение концентрации гемоглобина в одном эритроците может быть адекватной реакцией, поскольку соответствует сдвигу кривой диссоциации влево [15].

Животные после свободного плавания в условиях холодного воздействия характеризовались уменьшением концентрации гемоглобина в эритроците и повышением количества ретикулоцитов, что обеспечивало поддержание нормального уровня кислорода в крови при физической нагрузке [16]. Напротив, ступенчатая плавательная нагрузка у крыс с грузом, составлявшим 4 % от массы тела, способствовала увеличению гематокрита и уровня гемоглобина – вероятно, вследствие гемоконцентрации крови, поскольку в условиях термонейтральной среды данный эффект отсутствовал [17].

В то же время повышение количества, диаметра и площади поверхности эритроцитов с тенденцией к правостороннему сдвигу одновершинной кривой Прайс-Джонса у крыс с

грузом не сопровождалось ретикулоцитозом, что не характерно для физической нагрузки [17] и может быть следствием «перекрестной адаптации» в связи с недостаточной продолжительностью периода холодного воздействия. Показано, что в условиях пролонгированной гипотермии количество ретикулоцитов у крыс возрастает [18].

Отсутствие повышения количества ретикулоцитов в условиях гемоконцентрации можно рассматривать в связи с гипероксическим состоянием крови при тканевой гипоксии [15]. Эти результаты не противоречат выводам [19] о том, что гипоксический и температурный факторы (нами рассматриваются при холодном воздействии) могут оказывать негативное влияние на организм независимо друг от друга при превалировании воздействия гипоксии.

Наличие значимой отрицательной корреляционной связи между количеством ретикулоцитов и эритроцитов только у крыс, свободно плававших в холодной среде, возможно, является следствием работы скрытого механизма регуляции эритроцитарного пула у животных.

Анализ этих положений особенно интересен при холодном воздействии в случае максимальной нагрузки, поскольку отсутствие повышения количества ретикулоцитов в крови крыс, плававших с грузом, соответствует данным при пролонгированной мышечной активности у элитных спортсменов [20] и может рассматриваться в качестве ценного свидетельства регуляции морфофункционального состояния крови, направленной в конечном итоге на долгосрочную адаптацию организма.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о трансформациях морфофункционального состояния красной крови у животных в зависимости от влияния на организм водно-холодовой среды, характера, длительности, интенсивности мышечной нагрузки и развития гемоконцентрации, которая, вероятно, нивелирует реализацию адаптационных изменений красной крови. Комплексное воз-

действие ступенчатой плавательной нагрузки и температурного фактора внутренней и внешней среды на эритроцитарную реакцию сочетается с отсутствием ретикулоцитоза. Выяснению физиологического значения этого феномена в условиях адаптации к водно-холодовому воздействию будут посвящены наши последующие исследования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список литературы

1. Daanen H.A.M., Van Marken Lichtenbelt W.D. Human Whole Body Cold Adaptation // *Temperature* (Austin). 2016. Vol. 3, № 1. P. 104–118. <https://doi.org/10.1080/23328940.2015.1135688>
2. Rostomily K.A., Jones D.M., Pautz C.M., Ito D.W., Buono M.J. Haemoconcentration, Not Decreased Blood Temperature, Increases Blood Viscosity During Cold Water Immersion // *Diving Hyperb. Med.* 2020. Vol. 50, № 1. P. 24–27. <https://doi.org/10.28920/dhm50.1.24-27>
3. Агишев А.А., Фатеев И.С. Корреляция мощности и уровня гемоглобина для формирования спортивного результата // *Здоровье человека, теория и методика физ. культуры и спорта.* 2019. № 2(13). С. 110–120.
4. Бойков В.Л., Мельников А.А., Подоляка О.Б. Особенности гематологических показателей у пловцов элитной и высокой квалификации // *Физическая культура и спорт. Олимпийское образование: материалы междунар. науч.-практ. конф.* Краснодар: КГУФКСТ, 2021. С. 162–164.
5. Королев Д.С., Архангельская А.Н., Фесюн А.Д., Гуревич К.Г. Особенности изменений гематологических и биохимических показателей у спортсменов-борцов // *Физиология человека.* 2021. Т. 47, № 5. С. 95–101. <https://doi.org/10.31857/S0131164621040056>
6. Mairbäurl H. Red Blood Cells in Sports: Effects of Exercise and Training on Oxygen Supply by Red Blood Cells // *Front. Physiol.* 2013. Vol. 4. Art. № 332. <https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00332>
7. Рыбина И.Л., Жлобович И.Н., Кручинский Н.Г. Ретикулоциты периферической крови как маркер оценки адаптации системы транспорта кислорода к физическим нагрузкам у спортсменов циклических видов спорта // *Здоровье для всех.* 2018. № 1. С. 11–16.
8. Монгалёв Н.П., Рубцова Л.Ю., Потолицына Н.Н. Глава 10. Реактивность нормоцитов красной крови человека в условиях физической нагрузки и острой нормобарической гипоксии // *Физиолого-биохимические механизмы обеспечения спортивной деятельности зимних циклических видов спорта / отв. ред. Е.Р. Бойко.* Сыктывкар: Коми респ. тип., 2019. С. 102–114.
9. Зараковский Г.М. Целевая функция адаптации человека (в развитие идей Всеволода Ивановича Медведева) // *Физиология человека.* 2014. Т. 40, № 6. С. 6–14. <https://doi.org/10.7868/S0131164614060150>
10. Gibson O.R., Taylor L., Watt P.W., Maxwell N.S. Cross-Adaptation: Heat and Cold Adaptation to Improve Physiological and Cellular Responses to Hypoxia // *Sports Med.* 2017. Vol. 47, № 9. P. 1751–1768. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0717-z>
11. Lubkowska A., Bryczkowska I., Gutowska I., Rotter I., Marczuk N., Baranowska-Bosiacka I., Banfi G. The Effects of Swimming Training in Cold Water on Antioxidant Enzyme Activity and Lipid Peroxidation in Erythrocytes of Male and Female Aged Rats // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2019. Vol. 16, № 4. Art. № 647. <https://doi.org/10.3390/ijerph16040647>
12. Тодоров Й. Клинические лабораторные исследования в педиатрии. София: Медицина и физкультура, 1968. 1065 с.
13. Гланц С. Медико-биологическая статистика. М.: Практика, 1999. 459 с.
14. Danzl D.F., Pozos R.S. Accidental Hypothermia // *N. Engl. J. Med.* 1994. Vol. 331, № 26. P. 1756–1760. <https://doi.org/10.1056/NEJM199412293312607>
15. Иржак Л.И., Гладилов В.В., Мойсеенко Н.А. Дыхательная функция крови в условиях гипероксии. М.: Медицина, 1985. 176 с.

16. Кручинский Н.Г., Рыбина И.Л., Нехвядович А.И., Жлобович И.Н. Содержание ретикулоцитов и их субпопуляций различной степени зрелости: адаптационные изменения и взаимосвязь с другими показателями эритроцитарного звена и физической работоспособности в процессе подготовки биатлонистов высокой квалификации // Спортив. медицина: наука и практика. 2011. № 4. С. 7–13.

17. Монгалеv Н.П., Вахнина Н.А., Бойко Е.Р. Реакция эритроцитов крыс на ступенчатую плавательную нагрузку и тест «до отказа» в термонейтральной среде // Уч. зап. Казан. гос. акад. ветеринар. медицины им. Н.Э. Баумана. 2023. Т. 256, № 4. С. 178–184.

18. Аль-Рабиш М.А.М. Свободнорадикальный гомеостаз и структурно-функциональное состояние мембран эритроцитов крыс при гипотермии: дис. ... канд. биол. наук. Махачкала, 2016. 133 с.

19. Ким А.Е., Шустов Е.Б., Зайцева И.П., Лемещенко А.В. Патологические механизмы неблагоприятного взаимодействия гипоксии и температурных факторов в отношении физической работоспособности // Патол. физиология и эксперим. терапия. 2022. Т. 66, № 4. С. 94–106. <https://doi.org/10.25557/0031-2991.2022.04.94-106>

20. Banfi G. Reticulocytes in Sports Medicine // Sports Med. 2008. Vol. 38, № 3. P. 187–211. <https://doi.org/10.2165/00007256-200838030-00002>

References

1. Daanen H.A.M., Van Marken Lichtenbelt W.D. Human Whole Body Cold Adaptation. *Temperature (Austin)*, 2016, vol. 3, no. 1, pp. 104–118. <https://doi.org/10.1080/23328940.2015.1135688>

2. Rostomily K.A., Jones D.M., Pautz C.M., Ito D.W., Buono M.J. Haemoconcentration, Not Decreased Blood Temperature, Increases Blood Viscosity During Cold Water Immersion. *Diving Hyperb. Med.*, 2020, vol. 50, no. 1, pp. 24–27. <https://doi.org/10.28920/dhm50.1.24-27>

3. Agishev A.A., Fateev I.S. Correlation of Power and Hemoglobin Level for the Formation of a Sports Result. *Health Phys. Cult. Sports*, 2019, no. 2, pp. 110–120 (in Russ.).

4. Boykov V.L., Mel'nikov A.A., Podolyaka O.B. Osobennosti gematologicheskikh pokazateley u plovtsov elitnoy i vysokoy kvalifikatsii [Haematological Parameters in Elite and Highly Qualified Swimmers]. *Fizicheskaya kul'tura i sport. Olimpiyskoe obrazovanie* [Physical Education and Sports. Olympic Education]. Krasnodar, 2021, pp. 162–164.

5. Korolev D.S., Arkhangel'skaya A.N., Gurevich K.G., Fesyun A.D. Characteristics of Changes in Hematological and Biochemical Parameters of Wrestling Athletes. *Hum. Physiol.*, 2021, vol. 47, no. 5, pp. 558–563. <https://doi.org/10.1134/S0362119721040058>

6. Mairbäurl H. Red Blood Cells in Sports: Effects of Exercise and Training on Oxygen Supply by Red Blood Cells. *Front. Physiol.*, 2013, vol. 4. Art. no. 332. <https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00332>

7. Rybina I.L., Zhlobovich I.N., Kruchinskiy N.G. Retikulotsity perifericheskoy krovi kak marker otsenki adaptatsii sistemy transporta kisloroda k fizicheskim nagruzkam u sportsmenov tsiklicheskikh vidov sporta [Peripheral Blood Reticulocytes as a Marker for Assessing the Adaptation of the Oxygen Transport System to Physical Activity in Athletes Doing Cyclic Sports]. *Zdorov'e dlya vsekh*, 2018, no. 1, pp. 11–16.

8. Mongalyov N.P., Rubtsova L.Yu., Potolitsyna N.N. Glava 10. Reaktivnost' normotsitov krasnoy krovi cheloveka v usloviyakh fizicheskoy nagruзки i ostroy normobaricheskoy gipoksii [Chapter 10. Reactivity of Human Normocytic Red Blood Cells During Physical Exertion and Acute Normobaric Hypoxia]. Boyko E.R. (ed.). *Fiziologo-biokhimicheskie mekhanizmy obespecheniya sportivnoy deyatel'nosti zimnikh tsiklicheskikh vidov sporta* [Physiological and Biochemical Mechanisms of Sports Activity in Cyclic Winter Sports]. Syktyvkar, 2019, pp. 102–114.

9. Zarakovsky G.M. The Objective Function of Human Adaptation: Developing the Ideas of Vsevolod I. Medvedev. *Hum. Physiol.*, 2014, vol. 40, no. 6, pp. 589–596. <https://doi.org/10.1134/S0362119714060139>

10. Gibson O.R., Taylor L., Watt P.W., Maxwell N.S. Cross-Adaptation: Heat and Cold Adaptation to Improve Physiological and Cellular Responses to Hypoxia. *Sports Med.*, 2017, vol. 47, no. 9, pp. 1751–1768. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0717-z>

11. Lubkowska A., Bryczkowska I., Gutowska I., Rotter I., Marczuk N., Baranowska-Bosiacka I., Banfi G. The Effects of Swimming Training in Cold Water on Antioxidant Enzyme Activity and Lipid Peroxidation in Erythrocytes of Male and Female Aged Rats. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2019, vol. 16, no. 4. Art. no. 647. <https://doi.org/10.3390/ijerph16040647>

12. Todorov Y. *Klinicheskie laboratornye issledovaniya v pediatrii* [Clinical Laboratory Research in Paediatrics]. Sofia, 1968. 1065 p.

13. Glantz S. *Primer of Biostatistics*. New York, 1997. 473 p. (Russ. ed.: Glants S. *Mediko-biologicheskaya statistika*. Moscow, 1999. 459 p.).

14. Danzl D.F., Pozos R.S. Accidental Hypothermia. *N. Engl. J. Med.*, 1994, vol. 331, no. 26, pp. 1756–1760. <https://doi.org/10.1056/NEJM199412293312607>

15. Irzhak L.I., Gladilov V.V., Moysenko N.A. *Dykhatel'naya funktsiya krovi v usloviyakh giperoksii* [The Respiratory Function of the Blood Under Hyperoxia]. Moscow, 1985. 176 p.

16. Kruchinskiy N.G., Rybina I.L., Nekhvadovich A.I., Zhlobovich I.N. Soderzhanie retikulotsitov i ikh subpopulyatsiy razlichnoy stepeni zrelosti: adaptatsionnye izmeneniya i vzaimosvyaz' s drugimi pokazatelyami eritrotsitarnogo zvena i fizicheskoy rabotosposobnosti v protsesse podgotovki biatlonistov vysokoy kvalifikatsii [Concentrations of Reticulocytes and Their Subpopulations of Varying Maturity: Adaptive Changes and Relationship with Other Erythrocyte Parameters and Physical Performance in Highly Qualified Biathletes in the Course of Training]. *Sportivnaya meditsina: nauka i praktika*, 2011, no. 4, pp. 7–13.

17. Mongalev N.P., Vakhnina N.A., Boyko E.R. Reaktsiya eritrotsitov krysa na stupenchatuyu plavatel'nyuyu nagruzku i test "do otkaza" v termoneutral'noy srede [Response of Erythrocytes to Gradually Increased Swimming Exercise and Swimming Test to Exhaustion in Thermoneutral Water]. *Uchenye zapiski Kazanskoy gosudarstvennoy akademii veterinarnoy meditsiny im. N.E. Baumana*, 2023, vol. 256, no. 4, pp. 178–184.

18. Al'-Rabii M.A.M. *Svobodnoradikal'nyy gomeostaz i strukturno-funktsional'noe sostoyanie membran eritrotsitov krysa pri gipotermii* [Free Radical Homeostasis and the Structural and Functional State of Erythrocyte Membranes in Rats During Hypothermia: Diss.]. Makhachkala, 2016. 133 p.

19. Kim A.E., Shustov E.B., Zaitseva I.P., Lemeshchenko A.V. Pathophysiological Mechanisms of Adverse Interaction of Hypoxia and Temperature Factors in Relation to Physical Working Ability. *Patologicheskaya fiziologiya i eksperimental'naya terapiya*, 2022, vol. 66, no. 4, pp. 94–106 (in Russ.). <https://doi.org/10.25557/0031-2991.2022.04.94-106>

20. Banfi G. Reticulocytes in Sports Medicine. *Sports Med.*, 2008, vol. 38, no. 3, pp. 187–211. <https://doi.org/10.2165/00007256-200838030-00002>

Поступила в редакцию 24.12.2024 / Одобрена после рецензирования 18.10.2025 / Принята к публикации 23.10.2025
Submitted 24 December 2024 / Approved after reviewing 18 October 2025 / Accepted for publication 23 October 2025