Дата публикации: 01.09.2025
DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_03_14
УДК 612.57.04

Publication date: 01.09.2025
DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_03_14
UDC 612.57.04

ГЕНДЕРНЫЕ И ВОЗРАСТНЫЕ РАЗЛИЧИЯ В МЕТАБОЛИЧЕСКИХ РЕАКЦИЯХ НА ГИПОКСИЮ

Р.В. Тамбовцева, В.В. Волков, Ю.С. Евстифеев
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет спорта «ГЦОЛИФК», г. Москва, Россия

Аннотация. ***Введение.*** Целью настоящей обзорной статьи является анализ и обобщение научной литературы, посвященной комплексному исследованию ответных реакций на гипоксическое воздействие у людей обоих полов и разного возраста. ***Методы.*** Проведен поиск научных литературных источников в базах данных eLIBRARY.RU, PubMed, КиберЛенинка, проанализировано 20 публикаций. ***Результаты.*** Было показано, что у женщин физиологический ответ на гипоксию отличается от мужчин, и наблюдается более выраженная гипоксемия, что может быть связано с пониженной чувствительностью к хеморефлексам и меньшей вентиляцией по сравнению с мужчинами в условиях гипоксии. Кроме того, было выявлено, что у мужчин выше симпатическая активность в ответ на гипоксию, тогда как у женщин отмечается менее выраженная реакция сердечно-сосудистой системы. В старших возрастных группах наблюдается уменьшение вентиляционного ответа на гипоксию и гиперкапнию. ***Заключение.*** Анализ данных литературы показал, что реакция организма на гипоксическое воздействие может отличаться в зависимости от пола и возраста.
Ключевые слова: гипоксия, пол, возраст, женщины, мужчины, сердечно-сосудистая система, гормоны, эстрогены, нейропротекция, вазоконстрикция.

GENDER AND AGE DIFFERENCES IN METABOLIC RESPONSES TO HYPOXIA

R.V. Tambovtseva, V.V. Volkov, Yu.S. Evstifeev
Russian University of Sports “GTSOLIFK”, Moscow, Russia

Abstract. ***Introduction.*** The objective of this review article – to analyze and summarize the scientific literature devoted to a comprehensive study of responses to hypoxic exposure in people of both genders and different ages. ***Methods.*** A search of scientific literature sources was conducted in the eLIBRARY.RU, PubMed, CyberLeninka databases. 20 publications were analyzed. ***Results.*** It has been shown that the physiological response to hypoxia in women differs from that in men and more pronounced hypoxemia is observed, which may be associated with reduced sensitivity to chemoreflexes and less ventilation compared to men under hypoxic conditions. In addition, it has been discovered that men have higher sympathetic activity in response to hypoxia, while women have a less pronounced response of the cardiovascular system. In older age groups, a decrease in the ventilatory response to hypoxia and hypercapnia has also been observed. ***Conclusion.*** Analysis of literature sources has shown that the body's response to hypoxic exposure may differ depending on gender and age.
Keywords: hypoxia, gender, age, women, men, cardiovascular, hormones, estrogens, neuroprotection, vasoconstriction.

Введение. Гипоксическое состояние – это сложное многоуровневое и многофакторное явление, которое развивается при нарушении доставки или усвоения кислорода организмом. Компенсаторные механизмы могут временно поддерживать жизнедеятельность клеток, но при продолжительной гипоксии развиваются глубокие метаболические и структурные нарушения, ведущие к повреждению тканей и органов [1, 2]. Временная гипоксия стимулирует адаптивные процессы, однако при хроническом кислородном дефиците развиваются серьезные метаболические нарушения, такие как ацидоз и повреждение клеток, что может привести к необратимым изменениям в тканях и органах [3].

Гипоксическая реакция организма варьирует в зависимости от пола и возраста, влияя на биохимические и физиологические процессы. У женщин гипоксия вызывает более выраженную гипоксемию и

повышенные уровни глюкозы при восстановлении, тогда как у мужчин выше симпатическая активность и воспалительный ответ [4, 5]. Возрастные изменения также играют роль: у пожилых людей снижается вентиляционный ответ на гипоксию, особенно у женщин, что увеличивает их уязвимость к кислородному дефициту. Половые гормоны, особенно эстрогены, оказывают нейропротекторное и вазодилататорное действие, ослабляя последствия гипоксии у женщин, особенно в лютеиновой фазе [6, 7].

Поэтому целью настоящей обзорной статьи является анализ и обобщение научной литературы, посвященной комплексному исследованию ответных реакций на гипоксическое воздействие у людей разного пола и возраста.

Методы и организация исследования. Проведен поиск научных литературных источников, посвященных различиям в реакциях на гипоксию у мужчин и женщин разного возраста, с использованием различных баз данных: eLIBRARY.RU, PubMed, КиберЛенинка. Было проанализировано 20 публикаций по данной проблеме. В обзор включены 4 источника российских ученых и 16 источников на иностранном языке.

Результаты исследования и их обсуждение. *Актуальность изучения проблемы гипоксического воздействия на мужчин, женщин и людей разного возраста.* Поднятая проблема является достаточно актуальной, поскольку реакции организма на гипоксию у мужчин и женщин существенно различаются. Особенно это важно учитывать в тренировочном процессе вследствие разного гормонального фона и неодинаковой реакции организма тренирующихся на недостаток кислорода во время физической нагрузки. Кроме того, необходимо учитывать все возрастные биохимические и физиологические аспекты развивающегося и стареющего организма, чтобы не навредить здоровью людей разного возраста при выполнении физических упражнений.

Половые и возрастные различия организма на гипоксический стимул. В ответах организма на гипоксию существуют значительные различия, связанные с полом и возрастом, которые влияют как на физиологические, так и на биохимические аспекты [1-3, 8, 9]. У женщин физиологический ответ на гипоксию отличается от мужчин. В частности, у женщин наблюдается более выраженная гипоксемия, что может быть связано с пониженной чувствительностью к хеморефлексам и меньшей вентиляцией по сравнению с мужчинами в условиях гипоксии [10, 11].

Исследования показывают, что у женщин уровни глюкозы выше во время восстановления после гипоксических упражнений, тогда как уровень лактата ниже, что отражает гендерные различия в метаболических реакциях на гипоксию [12]. Также наблюдаются различия в кардиоваскулярных реакциях. У мужчин выше симпатическая активность в ответ на гипоксию, тогда как у женщин отмечается менее выраженная реакция сердечно-сосудистой системы [13].

В гипоксических условиях мужские и женские клетки по-разному реагируют на повреждения митохондрий [14]. В исследовании показано, что после гипоксии у самок мышей наблюдается более выраженная потеря митохондриальной массы и потенциала мембраны, что приводит к большему повреждению клеток по сравнению с самцами. Это связано с тем, что у самцов увеличивается содержание митохондриальной ДНК и активируются гены, ответственные за биогенез митохондрий, такие как Tfam и PGC-1α, что позволяет им лучше переносить гипоксический стресс [14]. При гипоксии у самцов мышей наблюдается более выраженная продукция провоспалительных цитокинов, таких как IL-6 и TNF-α, что приводит к усиленной воспалительной реакции и подавлению активности Т-лимфоцитов. У самок такой сдвиг иммунного ответа не наблюдается, что свидетельствует о лучшей переносимости гипоксии без значительного воспалительного ответа [15].

При гипоксии у мужских клеток чаще активируется путь апоптоза, связанный с высвобождением AIF (фактора индукции апоптоза) из митохондрий, тогда как в женских клетках наблюдается высвобождение цитохрома С и активация каспаз, что приводит к апоптозу через каспаз-зависимый механизм. Удаление Parp-1 (фермент) у

женских клеток приводит к снижению активности каспаз, что снижает повреждения при гипоксии [16].

В старших возрастных группах наблюдается уменьшение вентиляционного ответа на гипоксию и гиперкапнию. Исследования показывают, что у пожилых людей по сравнению с молодыми людьми снижается как гипоксический, так и гиперкапнический респираторный ответ, что делает их более уязвимыми к гипоксическим состояниям [17]. У пожилых женщин наблюдается более выраженное падение сатурации кислорода при гипоксической вентиляции по сравнению с пожилыми мужчинами, что может свидетельствовать о сниженной способности к адаптации у женщин в старшем возрасте [10]. Также у женщин вентиляционный ответ на гипоксию может быть меньше по сравнению с мужчинами. В исследованиях показано, что женщины сталкиваются с более выраженной гипоксемией при воздействии гипоксии, а их реакция на хеморефлексы (которые регулируют дыхание) была ослаблена по сравнению с мужчинами [10].

Также исследования показали, что во время лютеиновой фазы вентиляционные ответы на гипоксию могут быть более выраженными по сравнению с фолликулярной фазой. Это связано с повышенными уровнями прогестерона, который усиливает вентиляцию и дыхательный отклик на гипоксию [18]. Лучшая толерантность к гипоксии наблюдается в лютеиновой фазе (с середины до конца цикла). Это связано с тем, что в этой фазе повышаются уровни прогестерона и эстрогена, что приводит к усилению вентиляционной реакции на гипоксию. Например, было показано, что в лютеиновой фазе увеличивается вентиляционная реакция на гипоксию, что помогает организму более эффективно адаптироваться к низкому уровню кислорода [19]. Худшее восприятие гипоксии наблюдается в фолликулярной фазе (начало цикла), когда уровни эстрогена и прогестерона ниже. В этой фазе у женщин отмечается сниженная вентиляционная реакция на гипоксические состояния, что может привести к большему чувству дискомфорта при воздействии гипоксии [4].

У взрослых при длительном воздействии гипоксии развиваются хронические изменения в легких и сердце, такие как увеличение давления в легочной артерии и гипертрофия правого желудочка. Однако защитные механизмы, связанные с гипоксией, могут сохраняться даже спустя несколько месяцев после прекращения гипоксического воздействия [5].

Мозг женщин показывает большую устойчивость к гипоксии благодаря более выраженной нейропротекции, опосредованной эстрогенами. В частности, эстрогены, взаимодействуя с рецепторами на поверхности нейронов, оказывают более сильный нейропротекторный эффект у мужчин, чем у женщин, что связано с повышением уровня рецепторов β/α-эстрогена в условиях гипоксии [6].

Половые гормоны, особенно эстрогены, ослабляют вазоконстрикцию легочных артерий при гипоксии. У женщин во время фазы пролиферации менструального цикла наблюдается более слабая вазоконстрикция по сравнению с мужчинами, что может защищать их от более серьезных последствий гипоксии [7]. При гипоксии в гранулезных клетках яичников активируются механизмы задержки клеточного цикла в фазе G0/G1. Это происходит за счет активации сигнального пути, включающего белок FOXO1, который тормозит переход клеток из фазы G1 в фазу S. Этот процесс является адаптацией к гипоксическому стрессу и может влиять на фолликулярное развитие [12].

Гипоксия влияет на развитие сосудов в яичниках, что играет ключевую роль в фолликулярном развитии и формировании желтого тела. Однако гипоксия также может способствовать апоптозу клеток желтого тела и снижению синтеза прогестерона, что ускоряет лютеолиз и завершение цикла [20].

Заключение. Таким образом, гипоксическая реакция организма варьирует в зависимости от пола и возраста, влияя на биохимические и физиологические процессы. У женщин гипоксия вызывает более выраженную гипоксемию и повышенные уровни глюкозы при восстановлении, тогда как у мужчин выше симпатическая активность и воспалительный ответ. Возрастные изменения также играют роль: у

пожилых людей снижается вентиляционный ответ на гипоксию, особенно у женщин, что увеличивает их уязвимость к кислородному дефициту. Половые гормоны, особенно эстрогены, оказывают нейропротекторное и вазодилататорное действие, ослабляя последствия гипоксии у женщин, особенно в лютеиновой фазе.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колчинская, А.З. Нормобарическая интервальная гипоксическая тренировка в медицине и спорте. Руководство для врачей / А.З. Колчинская, Т.Н. Цыганова, Л.А. Остапенко. – М.: Медицина, 2003. – 408 с. [In English] Kolchinskaya A.Z., Tsyganova T.N., Ostapenko L.A. Normobaric interval hypoxic training in medicine and sports. Guidelines for doctors. Moscow: Meditsina, 2003. 408 p. (in Russ.)
2. Колчинская, А.З. Интервальная гипоксическая тренировка в спорте / А.З. Колчинская // Спортивная медицина. – 2008. – № 1 – С. 9-25. [In English] Kolchinskaya A.Z. Normobaric interval hypoxic training in medicine and sports. *Sports Medicine*, 2008, no. 1, pp. 9-25. (in Russ.)
3. Бурых, Э.А. Общие закономерности и индивидуальные особенности интегративного ответа организма человека на воздействие острой нормобарической гипоксии: автореферат дис. ... доктора медицинских наук: 03.03.01 / Эдуард Анатольевич Бурых. – Санкт-Петербург: Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова Российской академии наук, 2020. – 40 с. [In English] Burykh E.A. General patterns and individual characteristics of the integrative response of the human body to the effect of acute normobaric hypoxia: an author's abstract. Saint Petersburg: I.M. Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry of the Russian Academy of Sciences, 2020. 40 p. (in Russ.)
4. Takase, K. Modulating effects of the menstrual cycle on cardiorespiratory responses to exercise under acute hypobaric hypoxia Asano / K. Takase, T. Nishiyasu, K. Asano // The Japanese journal of physiology. – 2002. – Vol. 52. – No. 6. – P. 553-560.
5. Kolář, F. Molecular mechanisms of cardiac protection by adaptation to chronic hypoxia / F. Kolář, B. Ošťádal // Physiol Res. – 2004. – Vol. 53. – No. Suppl. 1. – P. S3-S13.
6. Heyer, A. In vitro gender differences in neuronal survival on hypoxia and in 17β-estradiol-mediated neuroprotection / A. Heyer, M. Hasselblatt, Von N. Ahsen // Journal of Cerebral Blood Flow Metabolism. – 2005. – Vol. 25. – No. 4. – P. 427-430.
7. Lahm, T. Endogenous estrogen attenuates pulmonary artery vasoreactivity and acute hypoxic pulmonary vasoconstriction: the effects of sex and menstrual cycle / T. Lahm, K.M. Patel, P.R. Crisostomo // American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism. – 2007. – Vol. 293. – No. 3. – P. E865-E871.
8. Иорданская, Ф.А. Гипоксия в тренировке спортсменов и факторы, повышающие ее эффективность: монография / Ф.А. Иорданская. – М.: Советский спорт, 2015. – 160 с. [In English] Iordanskaya F.A. Hypoxia in training athletes and factors that increase its effectiveness: a monograph. Moscow: Soviet Sport, 2015. 160 p. (in Russ.)
9. Park, H.Y, Effects of interval training under hypoxia on the autonomic nervous system and arterial and hemorheological function in healthy women / H.Y. Park, W.S. Jung, S.W. Kim // International Journal of Women's Health. – 2022. – P. 79-90.
10. Zhao, J. Hypoxic breathing produces more intense hypoxemia in elderly women than in elderly men / J. Zhao, Y. Ding, G.P. Kline // Frontiers in Physiology. – 2022. – Vol. 13. – P. 989635.
11. Camacho-Cardenosa, A. Effects of high-intensity interval training under normobaric hypoxia on cardiometabolic risk markers in overweight/obese women / A. Camacho-Cardenosa, M. Camacho-Cardenosa, J. Brazo-Sayavera // High Altitude Medicine Biology. – 2018. – Vol. 19. – No. 4. – P. 356-366.
12. Sandoval, D.A. Gender differences in the endocrine and metabolic responses to hypoxic exercise / D.A. Sandoval, K.S. Matt // Journal of Applied Physiology. – 2002. – Vol. 92. – No. 2. – P. 504-512.
13. Botek, M. Sex differences in autonomic cardiac control and oxygen saturation response to short-term normobaric hypoxia and following recovery: effect of aerobic fitness / M. Botek, J. Krejčí, A. McKune // Frontiers in endocrinology. – 2018. – Vol. 9. – P. 697.
14. Sharma, J. Sex differences in mitochondrial biogenesis determine neuronal death and survival in response to oxygen glucose deprivation and reoxygenation / J. Sharma, M.V. Johnston, M.A. Hossain // BMC neuroscience. – 2014. – Vol. 15. – P. 1-14.
15. Knöferl, M.W. Do female sex steroids adversely or beneficially affect the depressed

immune responses in males after trauma-hemorrhage? / M.W. Knöferl, U.C. Liener, D.H. Seitz // Archives of surgery. – 2000. – Vol. 135. – No. 4. – P. 425-433.
16. Sharma, J. Sex-specific activation of cell death signalling pathways in cerebellar granule neurons exposed to oxygen glucose deprivation followed by reoxygenation / J. Sharma, G. Nelluru, M.A. Wilson // ASN neuro. – 2011. – Vol. 3. – No. 2. – P. AN20100032.
17. Kronenberg, R.S. Attenuation of the ventilatory and heart rate responses to hypoxia and hypercapnia with aging in normal men / R.S. Kronenberg, C.W. Drage // Journal of clinical investigation. – 1973. – Vol. 52. – No. 8. – P. 1812-1819.
18. Regensteiner, J.G. Combined effects of female hormones and exercise on hypoxic ventilatory response / J.G. Regensteiner, R.G. McCullough, R.E. McCullough // Respiration physiology. – 1990. – Vol. 82. – No. 1. – P. 107-114.
19. Richalet, J.P. Ventilatory response to hypoxia and tolerance to high altitude in women: influence of menstrual cycle, oral contraception, and menopause / J.P. Richalet, F. Lhuissier, D. Jean // High Altitude Medicine Biology. – 2020. – Vol. 21. – No. 1. – P. 12-19.
20. Nishimura, R. Multiple roles of hypoxia in ovarian function: roles of hypoxia-inducible factor-related and-unrelated signals during the luteal phase / R. Nishimura, K. Okuda // Reproduction, Fertility and Development. – 2016. – Vol. 28. – No. 10. – P. 1479-1486.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Ритта Викторовна Тамбовцева – доктор биологических наук, профессор. Заведующая кафедрой биохимии и биоэнергетики спорта им. Н.И. Волкова, РУС «ГЦОЛИФК», Москва, e-mail: ritta7@mail.ru.
Василий Васильевич Волков – старший преподаватель кафедры биохимии и биоэнергетики спорта имени Н.И. Волкова, РУС «ГЦОЛИФК», Москва, e-mail: fitclub@list.ru.
Юрий Сергеевич Евстифеев – аспирант кафедры биохимии и биоэнергетики спорта, РУС «ГЦОЛИФК», Москва, e-mail: y.s.evstifeev@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Ritta V. Tambovtseva – Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Biochemistry and Bioenergy of Sports named after N.I. Volkov, RUS “GTSOLIFK”, Moscow, e-mail: ritta7@mail.ru.
Vasilij V. Volkov – Senior Lecturer of the Department of Biochemistry and Bioenergy of Sports named after N.I. Volkov, RUS “GTSOLIFK”, Moscow, e-mail: fitclub@list.ru.
Yurij S. Evstifeev – Post-Graduate Student of the Department of Biochemistry and Bioenergy of Sports, RUS “GTSOLIFK”, Moscow, e-mail: y.s.evstifeev@gmail.com.

Для цитирования: Тамбовцева, Р.В. Гендерные и возрастные различия в метаболических реакциях на гипоксию / Р.В. Тамбовцева, В.В. Волков, Ю.С. Евстифеев // Современные вопросы биомедицины. – 2025. – Т. 9. – № 3(33). DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_03_14

For citation: Tambovtseva R.V., Volkov V.V., Evstifeev Yu.S. Gender and age differences in metabolic responses to hypoxia. Modern Issues of Biomedicine, 2025, vol. 9, no. 3(33). DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_03_14