

# Біологічні предиктори толерантності до гіпоксії в спортсменів з анаеробним типом енергозабезпечення

УДК 612.17:612.014.4:796.015

**В. А. Пастухова, В. В. Сосновський,  
С. П. Краснова, О. В. Кучеренко**

Національний університет фізичного виховання і спорту України, Київ, Україна

**Резюме.** *Мета роботи* – визначити біологічні предиктори толерантності до гіпоксії середньогір'я в спортсменів високої кваліфікації з переважно анаеробним типом енергозабезпечення на основі показників варіабельності серцевого ритму (далі – ВСР) та реакції на активну ортостатичну пробу. *Методи.* Обстежено спортсменів високої кваліфікації (МС/МСМК, біг на середні дистанції; середній вік  $23,9 \pm 3,82$  року) та проведено оцінку адаптації під час двотижневого навчально-тренувального збору в умовах середньогір'я (2100 м) на 2–3-тю та 11–12-ту добу. Реєстрували ВСР у фоновому режимі та під час активної ортопроби; аналізували статистичні та спектральні параметри (VLF, LF, HF, VHF, TP, LF/HF) й показники ортостатичної реактивності (К30:15). *Результати.* За індивідуальними особливостями вегетативної регуляції спортсменів розподіляли на дві групи. У початковий період адаптації до середньогір'я виділено дві типологічні групи: 1-ша (41,7 %) характеризувалася високими значеннями ВСР із перевагою симпатичних впливів і високою напруженістю регуляторних процесів; 2-га (58,3 %) показниками помірної напруженості та більшою збалансованістю симпатичних і парасимпатичних впливів. На 11–12-ту добу перебування в середньогір'ї при ортостатичному тесті в 1-й групі відзначали вираженіші ознаки симпатoadреналової активації (зростання LF/HF до 2,86), тоді як у 2-й групі реакція була помірнішою (LF/HF – 1,55) при збереженні кращої вагусної компоненти у фоновому записі (вищі значення HF). Відсутність «нестійких» функціональних станів регуляції у 2-й групі розцінено як сприятливу ознаку підвищеної стійкості до гіпоксії та фізичних навантажень. *Висновки.* Так, комплекс показників ВСР (вихідний симпато-вагальний баланс, спектральний профіль та ортостатична реактивність) може розглядатися як біологічний інструмент прогнозування толерантності до гіпоксії середньогір'я та персоналізації режимів тренувального навантаження в спортсменів анаеробної спрямованості. **Ключові слова:** гіпоксія, середньогір'я, варіабельність серцевого ритму, автономна регуляція, ортостатична проба, спортсмени.

## Biological predictors of hypoxia tolerance in athletes with predominantly anaerobic energy supply

**V. A. Pastukhova, V. V. Sosnovsky, S. P. Krasnova, O. V. Kucherenko**

National University of Physical Education and Sports of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** *Aim* – to identify biological predictors of medium-altitude hypoxia tolerance in highly qualified athletes with predominantly anaerobic energy supply using heart rate variability (HRV) indices and responses to an active orthostatic test. Highly qualified athletes (Master of Sport / International Master of Sport; middle-distance runners; mean age  $23.9 \pm 3.82$  years) were examined. Adaptation to hypobaric hypoxia was assessed during a two-week training camp at 2100 m on days 2–3 and 11–12. HRV was recorded at rest and during an active orthostatic test. Time- and frequency-domain parameters

(VLF, LF, HF, VHF, total power, LF/HF) and orthostatic reactivity (30:15 ratio) were analyzed. Athletes were stratified into two groups according to individual autonomic regulation patterns (high vs moderate regulatory strain). Two typological patterns of early hypoxic adaptation were identified: Group 1 (41.7 %) demonstrated higher regulatory strain with sympathetic predominance, whereas Group 2 (58.3 %) showed moderate strain and a more balanced sympatho-vagal profile. On days 11–12, the orthostatic challenge elicited a stronger sympathetic shift in Group 1 (LF/HF up to 2.86) compared with Group 2 (LF/HF up to 1.55), while Group 2 maintained a more favorable baseline vagal component (higher HF). The absence of unstable regulatory states in Group 2 was interpreted as a beneficial marker of enhanced hypoxia and exercise tolerance. *Conclusions:* a combined HRV-based profile (baseline sympatho-vagal balance, spectral characteristics, and orthostatic reactivity) may serve as a biological predictor of medium-altitude hypoxia tolerance and support individualized training load management in anaerobic-oriented athletes.

**Keywords:** hypoxia, medium altitude, heart rate variability, autonomic regulation, orthostatic test, athletes.

**Постановка проблеми.** Гіпоксія середньогір'я є одним із найпотужніших природних стимулів адаптації, що модифікує кисневий каскад, обмежує біологічне окиснення і змінює енергетичне забезпечення клітин, запускаючи комплекс захисно-приспосувальних реакцій [3; 6; 10]. У спорті вищих досягнень гірське тренування розглядається не лише як підготовка до стартів у горах, а і як засіб підвищення функціональних резервів і працездатності на рівні моря. Водночас реакція на гіпоксію має виражену індивідуальну варіабельність, що зумовлює існування як сприятливих, так і несприятливих сценаріїв адаптації (підвищена напруженість регуляторних систем, ознаки перенапруження, зниження відновлювального потенціалу) [1; 4; 8].

Особливої уваги потребують спортсмени з переважно анаеробним типом енергозабезпечення, оскільки в умовах гіпоксії можливий розвиток гіпометаболічного стану зі зміщенням внеску енергосистем і пролонгованим залученням анаеробних механізмів на тлі зниженого аеробного компонента. Відповідно, пошук надійних біологічних предикторів толерантності до гіпоксії є практично значущим для персоналізації тренувальних навантажень, профілактики дезадаптації та оптимізації відновлення.

Варіабельності серцевого ритму (далі – ВСР) як індикатор автономної регуляції та напруженості адаптаційних механізмів активно застосовується для моніторингу стану спортсменів й оцінки впливу гіпоксії та гіпоксичного тренування [5]. Однак питання виділення комплексу ВСР-показників, які можуть виконувати роль предикторів індивідуальної толерантності саме у висококваліфікованих спортсменів з анаеробною спрямованістю, залишається актуальним і потребує уточнення на матеріалі реальних середньогірних зборів [2; 11].

**Зв'язок роботи з науковими програмами або практичними завданнями.** Робота виконана в межах науково-дослідної роботи Національного університету фізичного виховання і спорту України за темами «Ритмокардіографічні дослідження кваліфікованих спортсменів у різних видах спорту» (№ державної реєстрації 0116U001610) і «Особливості соматичних, вісцеральних та сенсорних систем у кваліфікованих спортсменів на різних етапах підготовки» (№ державної реєстрації 0116U001614).

**Мета роботи** – визначити біологічні предиктори толерантності до гіпоксії середньогір'я в спортсменів високої кваліфікації з переважно анаеробним типом енергозабезпечення за комплексом показників варіабельності серцевого ритму в стані відносного спокою та за активної ортостатичної проби.

**Методи й організація дослідження.** Оцінку адаптації до гіпоксичної гіпоксії організму залежно від індивідуальних особливостей вегетативної регуляції проводили під час двотижневого навчально-тренувального збору в умовах середньогір'я на висоті 2100 м на базі медико-біологічної станції Міжнародного центру астрономічних і медико-екологічних досліджень НАН України на 2–3-тю та на 11–12-ту добу перебування в горах. Усі спортсмени мали кваліфікацію МС і МСМК, члени збірної України, які спеціалізуються з бігу на середні дистанції. Середній вік обстежених спортсменів становив  $23,9 \pm 3,82$  року. Реєстрацію ВСР проводили у фазі активної ортостатичної проби; аналізували спектральні параметри: VLF, LF, HF, VHF, загальну потужність спектра (TP0–0,40), співвідношення LF/HF; для ортостатичної реактивності використовували показник K30:15. Дослідження виконано з дотриманням етичних принципів проведення

досліджень за участю людини (добровільна інформована згода, мінімізація ризиків, конфіденційність даних). Для аналізу й оцінки отриманих даних застосовували методи параметричної і непараметричної статистики, кореляційного, регресійного, кластерного й факторного аналізу [7].

#### Результати дослідження та їх обговорення.

За результатами дослідження всі спортсмени були розподілені на дві групи. До першої меншої за кількістю (41,7 %) групи ввійшли спортсмени, у яких показники варіабельності серцевого ритму становили нерегулярні кластери, до другої (58,3 %) – регулярні. Згідно з аналізом, проведеним у роботі, фізіологічні границі показників нерегулярних («аномальних») кластерів можуть бути зміщені в ділянку напруження або перенапруження регуляторних систем організму навіть за відсутності незначних функціональних навантажень.

У таблиці 1 наведено результати математичного аналізу варіабельності серцевого ритму в спортсменів в умовах середньогір'я в стані відносного спокою.

Ключовим результатом є виокремлення двох різних сценаріїв автономної регуляції в ранній фазі гіпоксичної адаптації. Перша група демонструвала

високе регуляторне напруження з перевагою симпатичного компонента, тоді як друга – помірне напруження й більш збалансований симпато-вагальний контроль. У термінах толерантності до гіпоксії це означає менший ризик перенапруження в спортсменів 2-ї групи. Додатковим якісним маркером сприятливого перебігу адаптації була відсутність фактору нестійких станів у 2-й групі, що інтерпретовано як ознака підвищеної стійкості до гіпоксії та фізичних навантажень.

На 11–12-ту добу перебування в умовах середньогір'я за активної ортопроби виявлено різний ступінь зсуву автономного балансу. У 1-й групі (фон  $n = 20$ ; ортопроба  $n = 10$ ) відзначено різке зростання LF/HF до 2,86 (2,18; 3,55) при зниженні HF до 150 (91; 211), що відображає виражену симпатичну домінанту в умовах ортостатичного стресу. У 2-й групі (фон  $n = 28$ ; ортопроба  $n = 14$ ) LF/HF був у межах від 1,43 до 1,75, а вихідний (фоновий) вагусний компонент був вищим (HF 896 (774; 1005)), що узгоджується з більш «економним» регуляторним профілем. Показник K30:15 у 2-й групі становив 1,24, що характеризує адекватність ортостатичної реакції.

Отримані дані концептуально узгоджуються із сучасними літературними джерелами, що гіпоксія

ТАБЛИЦЯ 1 – Середні значення показників математичного аналізу ритму серця у спортсменів у початкову фазу адаптації до умов середньогір'я

Показники	1-ша група (n = 40)	2-га група (n = 56)
RRNN, мс	683 ± 46,5*	891 ± 49,3
Mo, мс	658 ± 45,8*	864 ± 48,4
SDNN, мс	22,7 ± 9,88	33,9 ± 9,79
AMo, %	82 ± 5,9*	57 ± 3,6
ΔR-R, мс	153 ± 39,4	208 ± 56,5
CV, %	3,3 ± 2,62	3,9 ± 1,95
pNN50, %	3,6 ± 3,01**	9,8 ± 3,56
IH	406 ± 105,3**	90 ± 30,9
IBP	526 ± 143,1**	257 ± 72,0
ПАПР	123 ± 9,4*	66 ± 7,1
ВПП	9,9 ± 2,75*	5,3 ± 1,68
VLF, мс <sup>2</sup> /Гц	581 ± 172,8*	810 ± 143,4
LF, мс <sup>2</sup> /Гц	639 ± 161,1	592 ± 84,5
HF, мс <sup>2</sup> /Гц	408 ± 105,1*	740 ± 73,9
VHF, мс <sup>2</sup> /Гц	755 ± 124,5**	231 ± 63,2
TP <sub>0,0,40</sub> , мс <sup>2</sup> /Гц	1625 ± 453,1	2147 ± 213,6
LF, %	39,5 ± 8,91	27,6 ± 4,98
HF, %	46,7 ± 5,96**	15,0 ± 2,71
LF nu	53,1 ± 10,12	49,0 ± 8,49
HF nu	41,8 ± 8,91*	61,5 ± 7,64
LF/HF	1,58 ± 0,214	0,79 ± 0,102

Примітка: n – кількість кардіоритмограм; відмінність між групами на рівні \* –  $p < 0,05$ ; \*\* –  $p < 0,01$ .

як стресор часто супроводжується підсиленням симпатичного тону та зниженням вагусних впливів, а HRV-показники та реакція на ортостатичний виклик можуть відображати індивідуальну «ціну адаптації» і потенційну схильність до несприятливих реакцій [5; 9].

Так, сукупність ознак, що можуть розглядатися як предиктори нижчої толерантності (потенційно «ризик-профіль») у спортсменів 1-ї групи:

- високий рівень регуляторного напруження та симпатичної домінанти у вихідних записах;
- різко підвищене LF/HF у відповідь на ортопробу на 11–12-ту добу;
- наявність ознак «нестійких станів» (як окремий якісний маркер).

Натомість предиктори вищої толерантності (більш сприятлива адаптація) у 2-й групі містять:

- помірну напруженість механізмів і більш збалансований автономний контроль у ранній фазі;
- відсутність фактору нестійких станів;
- вищий вихідний HF та помірніший симпатичний зсув при на 11–12-ту добу.

### Висновки

1. У спортсменів високої кваліфікації з переважно анаеробним типом енергозабезпечення в ранній фазі адаптації до умов середньогір'я виокремлюють дві типологічні групи автономної

регуляції: з високою (41,7 %) та помірною (58,3 %) напруженістю регуляторних процесів.

2. Спектральний профіль ВСР на 11–12-ту добу середньогірного перебування в умовах ортостатичного стресу демонструє зсув у бік симпатичної домінанти у спортсменів із високим регуляторним напруженням (LF/HF до 2,86) порівняно з групою помірної напруженості (LF/HF до 1,55), що може розглядатися як предиктор нижчої толерантності до гіпоксії.

3. Відсутність фактору нестійких станів у групі помірної напруженості є сприятливою ознакою та асоціюється з вищою стійкістю до гіпоксії і фізичних навантажень.

4. Комплексна оцінка ВСР (вихідний симпатовагальний баланс, спектральні характеристики та ортостатична реактивність) може бути біологічною основою для прогнозування індивідуальної толерантності до гіпоксії та персоналізації тренувальних програм в умовах середньогір'я.

### Перспективи подальших досліджень.

Доцільним є розширення прогностичної моделі завдяки включенню показників сатурації, еритропоетичних маркерів, параметрів відновлення та тренувального навантаження з подальшою валідацією HRV-профілю як інструмента стратифікації ризику дезадаптації в спортсменів різних анаеробних спеціалізацій.

### Література

1. Атаман Ю., Бріжата І., Жаркова А., Моїсеєнко І., Овечкін Д. Довгострокова варіабельність артеріального тиску у професійних спортсменів на силу та витривалість з офісною передгіпертензією за річний макрокцикл тренувань [Long-term blood pressure variability in professional strength and endurance athletes with office prehypertension during an annual macrocycle of training]. *Georgian Med News*. 2022;326:7–11.
2. Сосновський В., Пастухова В. Адаптація організму людини до гіпоксії [Adaptation of the human body to hypoxia]. *Вісник Черкаського університету, серія «Біологічні науки»*. Черкаси, 2017;1:97–106.
3. Bellovary BN, Wells A D, Fennel Z J, Ducharme J B, Houck J M, Mayschak T J, Gibson A L, Drum S N, Mermier C M. Could Orthostatic Stress Responses Predict Acute Mountain Sickness Susceptibility? *High Alt Med Biol*. 2023 Mar;24(1):19-26. DOI: 10.1089/ham.2021.0177
4. Chen B, Wu Z, Huang X, Li Z, Wu Q, Chen Z. Effect of altitude training on the aerobic capacity of athletes: A systematic review and meta-analysis. *Heliyon*. 2023 Sep 16;9(9):e20188. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e20188
5. Claiborne A, Alessio H, Slatery E, Hughes M, Barth E, Cox R. Heart Rate Variability Reflects Similar Cardiac Autonomic Function in Explosive and Aerobically Trained Athletes. *Int J Environ Res Public Health*. 2021 Oct 12;18(20):10669. DOI: 10.3390/ijerph182010669
6. Koelwyn GJ, Wong LE, Kennedy MD, Eves ND. The effect of hypoxia and exercise on heart rate variability, immune response, and

orthostatic stress. *Scand J Med Sci Sports*. 2013 Feb;23(1):e1-8. DOI: 10.1111/sms.12003

7. Kotronoulas G, Miguel S, Dowling M, Fernández-Ortega P, Colomer-Lahiguera S, Bağcıvan G, Pape E, Drury A, Semple C, Dieperink K B, Papadopoulou C. An Overview of the Fundamentals of Data Management, Analysis, and Interpretation in Quantitative Research. *Semin Oncol Nurs*. 2023 Apr;39(2):151398. DOI: 10.1016/j.soncn.2023.151398

8. Liu B, Yuan M, Yang M, Zhu H, Zhang W. The Effect of High-Altitude Hypoxia on Neuropsychiatric Functions. *High Alt Med Biol*. 2024 Mar;25(1):26-41. DOI: 10.1089/ham.2022.0136

9. Nordine M, Treskatsch S, Habazettl H, Gunga C, Brauns K, Dosel P, Petricek J, Opatz O. Orthostatic Resiliency During Successive Hypoxic, Hypovolemic, and Orthostatic Stress. *Front Physiol*. 2021;12:712422. DOI: 10.3389/fphys.2021.712422

10. Richalet JP, Hermand E, Lhuissier FJ. Cardiovascular physiology and pathophysiology at high altitude. *Nat Rev Cardiol*. 2024 Feb;21(2):75-88. DOI: 10.1038/s41569-023-00924-9

11. Sosnovsky VV, Pastukhova VA, Pornichenko VI, Filippov MM, Ilyin VM. Effects of medium-height mountain training on the functional abilities and physical fitness of mid-distance runners. *Journal of Physical Education and Sport, JPES*. 2019;19(4):2379–83. DOI: 10.7752/jpes.2019.04360

ORCID 0000-0002-0838-8893, vsosnovskiy@uni-sport.edu.ua

ORCID 0000-0001-8592-5624, s.krasnova@ukr.net

ORCID 0009-0007-5763-3481, Olgakuch2@uni-sport.edu.ua

Дата першого надходження статті до видання: 25.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.04.2026