

ФІЗІОЛОГІЯ ЛЮДИНИ ТА ТВАРИН

УДК 616.12-008.318:612.172

DOI <https://doi.org/10.33989/2025.11.1.336858>

Л. С. Вовканич

Львівський державний університет фізичної культури імені Івана Боберського
вул. Костюшка, 11, м. Львів, 79007, Україна
lsvovkanych@gmail.com
ORCID: 0000-0002-6642-6368

М. Р. Федьків

Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Грушевського, 4, м. Львів, 79005, Україна
maria.fedkiv@lnu.edu.ua
ORCID: 0000-0001-9180-3164

ВАРІАБЕЛЬНІСТЬ СЕРЦЕВОГО РИТМУ: СУЧАСНІ ПІДХОДИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ У СПОРТІ, МЕДИЦИНІ ТА БІОЛОГІЇ

Упродовж останніх років спостерігається стрімке зростання інтересу до застосування неінвазивних методів оцінки функціонального стану організму в медицині, спорті та професійній діяльності. Одним із провідних інструментів такого моніторингу є аналіз варіабельності серцевого ритму (BCR), що відображає ефективність та напруженість регуляторних систем, рівень фізіологічної адаптації та реакцію організму на навантаження. У статті представлено огляд сучасних уявлень про методологію аналізу BCR, зокрема часові, геометричні, спектральні та нелінійні методи. Описано переваги й обмеження кожного з підходів, окреслено вимоги до якості реєстрації сигналу, важливість стандартизації умов дослідження та врахування зовнішніх чинників, які можуть впливати на достовірність результатів. Значну увагу приділено можливостям практичного застосування BCR у спорті для моніторингу адаптації до фізичного навантаження, оцінки стану відновлення та запобігання перетренованості. Показано, що адаптація до фізичного навантаження супроводжується змінами у часових, спектральних та геометричних параметрах BCR, зокрема підвищенням SDNN, RMSSD, HF потужності та SD1. Наголошено, що BCR є мультидисциплінарним інструментом, ефективним у кардіології, психофізіології, спортивній науці та медицині праці. У статті узагальнено сучасні дані щодо практичної цінності показників BCR для моніторингу функціонального стану людини в динаміці.

Ключові слова: варіабельність серцевого ритму, фізичне навантаження, моніторинг, адаптація, регуляторні системи.

Упродовж останнього десятиліття зростає інтерес до неінвазивного моніторингу функціонального стану організму під час фізичних і психоемоційних навантажень. Один із провідних методів такого контролю — аналіз варіабельності серцевого ритму (BCR, англ. HRV), який відображає напруженість регуляторних систем та процеси адаптації організму людини до навантажень. У медицині аналіз BCR пов'язують із підвищеним ризиком серцево-судинних ускладнень і порушенням активності регуляторних систем в умовах стресу чи захворювань (Shaffer, & Ginsberg, 2017; Kim, Cheon, Bai, Lee, & Koo, 2018). У спортивній фізіології дослідження BCR широко застосовується для контролю навантаження, відновлення й адаптації (Laborde, Mosley, & Thayer, 2017; Park, & Thayer, 2014). Однак сфера використання аналізу BCR не обмежується лише спортом або кардіологією. Саме тому цей огляд має на меті проаналізувати сучасні знання про методи аналізу, можливості інтерпретації та практичне застосування показників BCR в медицині, спорті та біологічних дослідженнях.

Варіабельність серцевого ритму (BCP) – метод неінвазивної оцінки функціонального стану організму, що базується на реєстрації та аналізі послідовного ряду кардіоінтервалів (RR інтервалів). Тривалість RR інтервалів найчастіше визначають з використанням електрокардіографічних чи фотоплетизмографічних методик (Lisun, & Uhlev, 2020; Sundas et al., 2025). Рекомендують використовувати 5-хвилинні чи 24-годинні записи, при цьому норми та показники HRV для записів неоднакові, порівняння їхніх показників некоректне (Shaffer, & Ginsberg, 2017; Sundas et al., 2025).

На варіабельність ритму впливають вікові та статеві відмінності, генетичні чинники, рівень фізичної активності, вживання алкоголю чи медикаментів, тютюнопаління, час доби, положення тіла під час реєстрації, темп дихання тощо (Damoun, Amekran, Taiek, & Hangouche, 2024; Lundstrom, Foreman, & Biltz, 2022). Стандартизація умов реєстрації BCP (тривалість, положення тіла, вимоги до зовнішніх умов контроль дихання тощо) описана у багатьох рекомендаціях та публікаціях (Damoun, Amekran, Taiek, & Hangouche, 2024; Heart rate variability 1996; Sassi et al., 2015; Shaffer, & Ginsberg, 2017). Для точного аналізу необхідні високочастотні ЕКГ-записи, сучасні портативні пристрої (браслети, смарт-годинники) слід використовувати з обережністю (Sammito et al., 2024; Vovkanych, Boretsky, Sokolovsky, Berhtraum, & Kras, 2020; 2021).

Для аналізу BCP застосовують такі групи методів: методи статистичного аналізу (time domain methods, методи часового аналізу), геометричні методи аналізу (geometrical measures, варіаційна пульсометрія), спектральні методи аналізу (frequency domain methods), методи нелінійного аналізу (Aubert, Seps, & Beckers, 2009; Task Force, 1996a, 1996b; Lisun, & Uhlev, 2020; Sundas et al., 2025; Shaffer, & Ginsberg, 2017). Метод часового аналізу полягає в обробці статистичними методами певних масивів послідовних RR інтервалів і визначенні міри їх коливань на основі таких показників, як RMSSD (квадратний корінь суми різниць послідовного ряду RR інтервалів), SDNN (стандартне відхилення NN інтервалів RR) та інших.

У геометричних методах вивчають закономірності розподілу RR інтервалів. На основі кривої розподілу (гістограми) визначають її основні показники: Мо (мода), АМо (амплітуда моди), МхDMn (BP, Dx, ΔX – варіаційний розмах) та ІН (SI – індекс напруження, стрес-індекс) або RR tri index (HRV Ti – триангулярний індекс). Метод кореляційної ритмографії полягає у графічному відображенні послідовних пар кардіоінтервалів у двовимірній координатній площині. Утворений графік Пуанкаре (скатерограма) має форму еліпса. Визначають показник W (SD1, ширина основного еліпса скатерограми), L (SD2, довжина основного еліпса скатерограми), S (площа основного еліпса скатерограмми) тощо. Графік Пуанкаре розглядають як візуальний інструмент у нелінійних методах аналізу BCP (Sundas et al., 2025).

Спектральний аналіз дозволяє кількісно оцінити різні частотні складові коливань BCP та графічно представити співвідношення різних компонентів серцевого ритму (Lisun, & Uhlev, 2020; Sundas et al., 2025; Shaffer, & Ginsberg, 2017; Aubert, Seps, & Beckers, 2003; Stauss, 2003; Thayer, 2002). При коротких записах виділяють три головні спектральні компоненти: високочастотні (High Frequency – HF), низькочастотні (Low Frequency – LF) та дуже низькочастотні (Very Low Frequency – VLF) коливання. Виділяють також ультранизькочастотні коливання (Ultra Low Frequency – ULF). Зміни HF коливань пов'язують з вагусною активністю, походження інших компонентів спектру BCP є комплексним та дискусійним. Вірогідно, що показник LF характеризує переважно стан вплив симпатичного відділу. Потужність VLF пов'язана з активністю вищих відділів ЦНС та рівнем психоемоційного напруження.

До методів нелінійного аналізу BCP належать графік Пуанкаре, детрендований аналіз флуктуацій (DFA), ентропійний аналіз і рекурентні діаграми (Nayak et al., 2023; Sundas et al., 2025). DFA оцінює флуктуації RR інтервалів у різних масштабах, а ентропійні методи – нерегулярність ритму, зниження якої спостерігається при патологіях. Найчастіше застосовують апроксимовану ентропію (ApEn) та ентропію вибірки (SampEn), які кількісно відображають складність і передбачуваність часових рядів. Аналіз рекурентних діаграм дозволяє виявити повторювані патерни та обчислити показники, як-от детермінізм (DET) і ламінар-

ність (LAM). Ці методи особливо ефективні при наявності шумів та нестационарності сигналу (Sundas et al., 2025).

Для оцінки впливу фізичних навантажень на організм спортсменів використовують показники BCP, отримані різними методами. Під час гострого фізичного стресу варіабельність ритму знижується через активацію симпатичної та пригнічення парасимпатичної регуляції (Storniolo, Correale, Buzzachera, & Peyré-Tartaruga, 2025; Yang, Ma, Liang, Shi, & Wang, 2024). Після навантаження варіабельність зростає завдяки відновленню парасимпатичного тону. Водночас тривала адаптація до фізичних навантажень супроводжується наростанням загальної варіабельності ритму та збільшенням парасимпатичних впливів на ритмічні процеси (Aubert, Seps, & Beckers, 2003; Plews, Laursen, Stanley, Kilding, & Buchheit, 2013; Kovalenko, & Kudii, 2016; Prinsloo, Rauch, & Derman, 2014). Зокрема, за даними багатьох авторів, адаптація до фізичних навантажень супроводжується збільшенням тривалості кардіоінтервалів, підвищенням SDNN, RMSSD (а також Ln RMSSD) та pNN50 (Aubert, Seps, & Beckers, 2003; Plews, Laursen, Stanley, Kilding, & Buchheit, 2013; Dong, 2016; Sandercock, & Brodie, 2006; Sandercock, Gavin, & Bromley, 2005; Borresen & Lambert, 2008; da Silva, de Oliveira, Silveira, Mello, & Deslandes, 2015; Yang, Ma, Liang, Shi, & Wang, 2024; Storniolo, Correale, Buzzachera, & Peyré-Tartaruga, 2025) спортсменів у стані спокою. Зміни показників спектрального та геометричного аналізу проявляються у збільшенні загальної потужності спектру та підвищенні потужності HF коливань (Aubert, Seps, & Beckers, 2003; Bellenger et al., 2016; Sandercock, & Brodie, 2006; Sandercock, Gavin, & Bromley, 2005; Borresen & Lambert, 2008), зниженні потужності LF коливань (da Silva, de Oliveira, Silveira, Mello, & Deslandes, 2015) та збільшенні співвідношення LF/HF (Dong, 2016) а також SD1 (Bellenger et al., 2016). Використання функціональних проб виявило, що для тренуваних спортсменів характерне значне підвищення HRR (швидкості наростання ЧСС) під час навантажень та помірне підвищенням RMSSD, HF, SD1 після фізичних навантажень (Bellenger et al., 2016). Зміни BCP дозволяють проаналізувати динаміку адаптації та відновні процеси після різних навантажень, зокрема силових та тренувань на витривалість (Addleman, Lackey, De Blauw, & Hajduczek, 2024), які мають свої особливості впливу на BCP. Було становлено, що високоінтенсивні інтервальні тренування викликають найбільші зміни показників SDNN, RMSSD та LF/HF, силові навантаження найбільшою мірою впливають на потужність HF спектру, а комбіновані тренування на потужність LF коливань (Yang, Ma, Liang, Shi, & Wang, 2024).

Показники BCP можуть використовуватись з метою оцінювання розвитку втоми під впливом фізичних навантажень. У якості критерію втоми окремі автори пропонують використовувати підвищення ЧСС спокою, зміни RMSSD та зміни показників спектрального аналізу – зниження TP та HF та збільшення співвідношення LF/HF (Bosquet, Merkari, Arvisais, & Aubert, 2008; Schmitt et al., 2013; Barrero, 2019; Schmitt et al., 2015). Водночас аналіз показників LF, HF та HR у процесі розвитку втоми спортсменів дозволив припустити наявність кількох «профілів» змін вказаних вище параметрів (Schmitt et al., 2015, 2018), характерних для різних осіб.

Явища перетренованості можуть супроводжуватись збільшенням як симпатичних, так і парасимпатичних впливів на BCP (Le Meur et al., 2013). У спортсменів у стані перетренованості може спостерігатись зменшення показників частотного аналізу (TP, LF та HF) та часових параметрів BCP (RMSSD та SDNN), а також перерозподіл потужності спектру в напрямку LF та VLF хвиль (Dong, 2016; Kajaia, Maskhulia, Chelidze, Akhalkatsi, & Kakhabrishvili, 2017). Зниження показників RMSSD у тренувальному циклі може сигналізувати про перетренованість, тоді як поступове зростання варіативності ритму – про поступове відновлення і покращену адаптацію. Є дані, що корекція програми тренувань на основі показників BCP («BCP-кероване» тренування) може підвищити їхню ефективність (Addleman, Lackey, De Blauw, & Hajduczek, 2024). Водночас в різних видах спорту кореляція показників BCP з рівнем підготовленості спортсменів може бути різною.

Деякі дослідники зазначають відсутність універсальних критеріїв перетренованості за показниками BCP (Aubert, Seps, & Beckers, 2003), тоді як інші виявляють статистично значущі відмінності у спортсменів у стані перенапруження (Manresa-Rocamora, Sarabia, Javaloyes, Flatt, & Moya-Ramón, 2021; Addleman, Lackey, De Blauw, & Hajduczuk, 2024). Вказується також на важливість врахування індивідуальної «оптимальної» структури BCP (Plews, Laursen, Stanley, Kilding, & Buchheit, 2013), оскільки значна варіативність цих показників ускладнює створення універсальних оцінювальних критеріїв. Багато авторів наголошують на доцільності індивідуального підходу до аналізу функціонального стану спортсмена (Korobeinikov, Dudnik, & Radchenko, 2007; Vovkanych, & Kachmar, 2013).

Аналіз BCP допомагає контролювати рівень стресу спортсменів (Wels et al., 2023) чи працівників (Peabody, Ryznar, Ziesmann, & Gillman, 2023) за умов психоемоційного навантаження. Зростання психоемоційного навантаження чи тривалий стрес ведуть до зниження окремих показників BCP (особливо RMSSD, HF) (Kim, Cheon, Bai, D. Lee, & Koo, 2018; Thielmann, Pohl, & Böckelmann, 2021; Immanuel, Teferra, Baumert, & Bidargaddi, 2023). Дослідження рівня стресу медичного персоналу на основі BCP сконцентровані на аналізі SDNN, RMSSD, PNN50, LF% та LF/HF (Peabody, Ryznar, Ziesmann, & Gillman, 2023). Інші автори вважають, що AVNN, RMSSD, SDNN, HF та LF, а також співвідношення LF/HF дозволяють оцінити рівень стресу в здорових осіб зрілого віку (Immanuel, Teferra, Baumert, & Bidargaddi, 2023). Деякі із цих показників BCP змінюються і у випадку психічних розладів (депресії, тривожні розлади, шизофренія тощо) (Wang et al., 2025).

Виявлено (Jarczok et al., 2022; Sammito et al., 2024), що зниження величин SDNN, RMSSD та деяких інших показників BCP достовірно пов'язані з вищим рівнем смертності у загальній популяції. Показники BCP також використовується для оцінювання стану пацієнтів при серцево-судинних та онкологічних захворюваннях, ХОЗЛ чи хронічній нирковій недостатності (Zhang et al., 2023; Sammito et al., 2024). Низька варіабельність серцевого ритму у здорових осіб вказує на вищий ризик виникнення серцево-судинних захворювань, наприклад артеріальної гіпертензії (Sammito et al., 2024). З використанням BCP можна також оцінити позитивний вплив різних фізичних навантажень на осіб з різноманітними патологіями (El-Malahi et al., 2024). За даними BCP найбільші зміни виявлені у пацієнтів з серцевою недостатністю, менші – у пацієнтів із захворюванням периферичних артерій, ішемічною хворобою серця чи після інфаркту міокарда. Найефективнішими вправами були аеробні навантаження та водна аеробіка.

Перспективи досліджень BCP пов'язані з інтеграцією новітніх технологій і методів аналізу. Поширення портативних пристроїв дає змогу здійснювати тривалу реєстрацію BCP для моніторингу стану здоров'я та ранньої діагностики порушень (Sammito et al., 2024; Besson et al., 2025). Застосування штучного інтелекту й машинного навчання відкриває нові можливості інтерпретації, зокрема через створення багатоаспектного профілю BCP для діагностики та прогнозування (Wang et al., 2025). Удосконалення алгоритмів обробки сигналів та стандартизація аналізу підвищують надійність методу (Damoun, Amekran, Taiek, & Hangouche, 2024). У перспективі BCP може стати рутинним показником у мобільних пристроях для комплексної оцінки фізіологічного й психічного стану.

Висновок. Аналіз варіабельності серцевого ритму є актуальним методом оцінювання рівня напруженості функціонування регуляторних систем організму, динаміки адаптаційних змін, а також для оцінювання рівня психоемоційного стресу, функціональної підготовленості спортсменів, неспецифічним критерієм ризику виникнення та наявності низки захворювань. Водночас напрацювання кількісних критеріїв аналізу BCP ускладнюється індивідуальними та типологічними особливостями варіабельності серцевого ритму та залишається перспективним напрямком наукових досліджень.

REFERENCES

- Addleman, J. S., Lackey, N. S., De Blauw, J. A., & Hajduczuk, A. G. (2024). Heart Rate Variability Applications in Strength and Conditioning: A Narrative Review. *Journal of functional morphology and kinesiology*, 9(2), 93. DOI: 10.3390/jfmk9020093
- Aubert, A. E., Seps, B., & Beckers, F. (2003). Heart Rate Variability in Athletes. *Sports Medicine*, 33(12), 889-919. DOI: 10.2165/00007256-200333120-00003
- Barrero, A., Schnell, F., Carrault, G., Kervio, G., Matelot, D., Carre, F., & Le Douairon, S. (2019). Daily fatigue-recovery balance monitoring with heart rate variability in well-trained female cyclists on the Tour de France circuit. *PLoS One*, 14(3), e0213472. DOI: 10.1371/journal.pone.0213472
- Bellenger, C. R., Fuller, J. T., Thomson, R. L., Davison, K., Robertson, E. Y., & Buckley, J. D. (2016). Monitoring athletic training status through autonomic heart rate regulation: A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 46, 1461-1486. DOI: 10.1007/s40279-016-0484-2
- Besson, C., Baggish, A. L., Monteventi, P., Schmitt, L., Stucky, F., & Gremeaux V. (2025). Assessing the clinical reliability of short-term heart rate variability: insights from controlled dual-environment and dual-position measurements. *Scientific Reports*, 15(1), 5611. DOI: 10.1038/s41598-025-89892-3
- Borresen, J., & Lambert, M. I. (2008). Autonomic control of heart rate during and after exercise: Measurements and implications for monitoring training status. *Sports Medicine*, 38(8), 633-646. DOI: 10.2165/00007256-200838080-00002
- Bosquet, L., Merkari, S., Arvais, D., & Aubert, A. E. (2008). Is heart rate a convenient tool to monitor over-reaching? A systematic review of the literature. *British Journal of Sports Medicine*, 42(9), 709-714. DOI: 10.1136/bjsm.2007.042200
- da Silva, V. P., de Oliveira, N. A., Silveira, H., Mello, R. G. T., & Deslandes, A. C. (2015). Heart rate variability indexes as a marker of chronic adaptation in athletes: A systematic review. *Annals of Noninvasive Electrocardiology*, 20(2), 108-118. DOI: 10.1111/anec.12237
- Damoun, N., Amekran, Y., Taiek, N., & Hangouche, A. J. E. (2024). Heart rate variability measurement and influencing factors: Towards the standardization of methodology. *Global cardiology science & practice*, 2024(4), e202435. DOI: 10.21542/gcsp.2024.35
- Dias, D., & Cunha, J. P. S. (2018). Wearable health devices-Vital sign monitoring, systems and technologies. *Sensors*, 18(8), 2414. DOI: 10.3390/s18082414
- Dong, J.-G. (2016). The role of heart rate variability in sports physiology. *Experimental and Therapeutic Medicine*, 11, 1531-1536. DOI: 10.3892/etm.2016.3104
- Dunn, J., Runge, R., & Snyder, M. (2018). Wearables and the medical revolution. *Personalized Medicine*, 15(5), 429-448. DOI: 10.2217/pme-2018-0044
- El-Malahi, O., Mohajeri, D., Mincu, R., Bäuerle, A., Rothenaicher, K., Knuschke, R. ... Lortz, J. (2024). Beneficial impacts of physical activity on heart rate variability: A systematic review and meta-analysis. *PLoS One*, 19(4), e0299793. DOI: 10.1371/journal.pone.0299793
- Immanuel, S., Teffer, M. N., Baumert, M., & Bidargaddi, N. (2023). Heart Rate Variability for Evaluating Psychological Stress Changes in Healthy Adults: A Scoping Review. *Neuropsychobiology*, 82(4), 187-202. DOI: 10.1159/000530376
- Jarczok, M. N., Weimer, K., Braun, C., Williams, D. P., Thayer, J. F., Gündel, H. O., & Balint, E. M. (2022). Heart rate variability in the prediction of mortality: A systematic review and meta-analysis of healthy and patient populations. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 143, 104907. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2022.104907
- Kajaia, T., Maskhulia, L., Chelidze, K., Akhalkatsi, V., & Kakhbrishvili, Z. (2017). The effects of non-functional overreaching and overtraining on autonomic nervous system function in highly trained athletes. *Georgian Medical News*, 264, 97-103. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/319480207>
- Kim, H. G., Cheon, E. J., Bai, D. S., Lee, Y. H., & Koo, B. H. (2018). Stress and Heart Rate Variability: A Meta-Analysis and Review of the Literature. *Psychiatry Investigation*, 15(3), 235-245. DOI: 10.30773/pi.2017.08.17
- Korobeinikov, H. V., Dudnik, O. K., & Radchenko, Yu. A. (2007). Variabelnist sertsevoho rytmu u yunykhn bortsiv z riznym funktsionalnym stanom nervovoi systemy [Heart rate variability in young wrestlers with different functional states of the nervous system]. *Pedahohika, psykholohiia ta medyko-biologichni problemy fizychnoho vykhovannia i sportu* [Pedagogy, psychology and medical and biological problems of physical education and sports], 6, 157-160 [in Ukrainian].
- Kovalenko, S. O., & Kudii, L. I. (2016). Variabelnist sertsevoho rytmu: metodychnii aspekty [Heart rate variability: methodological aspects]. Cherkasy: Cherkaskyi natsionalnyi universytet im. B. Khmelnytskoho. Retrieved from <https://eprints.cdu.edu.ua/493/1/kov.pdf> [in Ukrainian].
- Laborde, S., Mosley, E., & Thayer, J. F. (2017). Heart rate variability and cardiac vagal tone in psychophysiological research – Recommendations for experiment planning, data analysis, and data reporting. *Frontiers in Psychology*, 8, 213. DOI: 10.3389/fpsyg.2017.00213
- Le Meur, Y., Pichon, A., Schaal, K., Schmitt, L., Louis, J., Gueneron, J. ... Hausswirth, Ch. (2013). Evidence of parasympathetic hyperactivity in functionally overreached athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 45(11), 2061-2071. DOI: 10.1249/MSS.0b013e3182980125
- Lisun, Yu. B., & Uhlev, Ye. I. (2020). Variabelnist sertsevoho rytmu, vykorystannia ta metody analizu [Heart rate variability, usage, and analysis methods]. *Pain, Anaesthesia & Intensive Care*, 4(93), 83-89. DOI: 10.25284/2519-2078.4(93).2020.220693 [in Ukrainian].
- Liu, Y., Wang, H., Zhao, W., Zhang, M., Qin, H., & Xie, Y. (2018). Flexible, stretchable sensors for wearable health monitoring: Sensing mechanisms, materials, fabrication strategies and features. *Sensors*, 18(2), 645. DOI: 10.3390/s18020645
- Lundstrom, C. J., Foreman, N. A., & Biltz, G. (2022). Practices and Applications of Heart Rate Variability Monitoring in Endurance Athletes. *International Journal of Sports Medicine*, 44(1), 9-19. DOI: 10.1055/a-1864-9726
- Majumder, S., Mondal, T., & Deen, M. J. (2017). Wearable sensors for remote health monitoring. *Sensors*, 17(12), 130. DOI: 10.3390/s17010130
- Manresa-Rocamora, A., Sarabia, J. M., Javaloyes, A., Flatt, A. A., & Moya-Ramón, M. (2021). Heart Rate Variability-Guided Training for Enhancing Cardiac-Vagal Modulation, Aerobic Fitness, and Endurance Performance: A Methodological Systematic Review with Meta-Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(19), 10299. DOI: 10.3390/ijerph181910299
- Nayak, S. K., Pradhan, B., Mohanty, B., Sivaraman, J., Ray, S. S., Wawrzyniak, J. ... Pal, K. (2023). A review of methods and applications for a heart rate variability analysis. *Algorithms*, 16(9), 433. DOI: 10.3390/a16090433
- Park, G., & Thayer, J. F. (2020). From the heart to the mind: Cardiac vagal tone modulates top-down and bottom-up visual perception and attention to emotional stimuli. *Frontiers in Psychology*, 11, 528. DOI: 10.3389/fpsyg.2014.00278

- Peabody, J. E., Ryznar, R., Ziesmann, M. T., & Gillman, L. (2023). A Systematic Review of Heart Rate Variability as a Measure of Stress in Medical Professionals. *Cureus*, 15(1), e34345. DOI: 10.7759/cureus.34345
- Plews, D. J., Laursen, P. B., Stanley, J., Kilding, A. E., & Buchheit, M. (2013). Training adaptation and heart rate variability in elite endurance athletes: Opening the door to effective monitoring. *Sports Medicine*, 43, 773-781. DOI: 10.1007/s40279-013-0071-8
- Prinsloo, G. E., Rauch, H. G. L., & Derman, W. E. (2014). A brief review and clinical application of heart rate variability biofeedback in sports, exercise, and rehabilitation medicine. *The Physician and Sportsmedicine*, 42(2), 88-99. DOI: 10.3810/psm.2014.05.2061
- Saboul, D., Balducci, P., Millet G., Pialoux, V., & Yantier, Ch. (2016). A pilot study on quantification of training load: The use of HRV in training practice. *European Journal of Sport Science*, 16(2), 172-181. DOI: 10.1080/17461391.2015.1004373
- Sammuto, S., Thielmann, B., Klusmann, A., Deußen, A., Braumann K.-M., & Böckelmann, I. (2024). Guideline for the application of heart rate and heart rate variability in occupational medicine and occupational health science. *Journal of occupational medicine and Toxicology*, 19(1), 15. DOI: 10.1186/s12995-024-00414-9
- Sandercock, G. R. H., & Brodie, D. A. (2006). The use of heart rate variability measures to assess autonomic control during exercise. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 16, 302-313. DOI: 10.1111/j.1600-0838.2006.00556.x
- Sandercock, G. R. H., Gavin, R. H., & Bromley, P. D. (2005). Effects of exercise on heart rate variability: Inferences from meta-analysis. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 37(3), 433-439. DOI: 10.1249/01.mss.0000155388.39002.9d
- Sassi, R., Cerutti, S., Lombardi, F., Malik, M., Huikuri, H. V., Peng, C.-K. ... Macfadyen, R. (2015). Advances in heart rate variability signal analysis: Joint position statement by the e-Cardiology ESC Working Group and the European Heart Rhythm Association co-endorsed by the Asia Pacific Heart Rhythm Society. *EP Europace*, 17(9), 1341-1353. DOI: 10.1093/europace/euv015
- Schmitt, L., Regnard, J., Coulmy, N., & Millet, G. P. (2018). Influence of training load and altitude on heart rate variability fatigue patterns in elite Nordic skiers. *International Journal of Sports Medicine*, 39(10), 773-781. DOI: 10.1055/a-0577-4429
- Schmitt, L., Regnard, J., Desmarests, M., Maune, F., Mourout, L., Fouillot, J.-P. ... Millet, G. (2013). Fatigue shifts and scatters heart rate variability in elite endurance athletes. *PLoS ONE*, 8(8), e71588. DOI: 10.1371/journal.pone.0071588
- Schmitt, L., Regnard, J., Parmentier, A. L., Maune, F., Mourout, L., Coulmy, N., & Millet, G. P. (2015). Typology of "fatigue" by heart rate variability analysis in elite Nordic-skiers. *International Journal of Sports Medicine*, 36(12), 999-1007. DOI: 10.1055/s-0035-1548885
- Shaffer, F., & Ginsberg, J. P. (2017). An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Frontiers in Public Health*, 28(5), 258. DOI: 10.3389/fpubh.2017.00258
- Stauss, H. M. (2003). Heart rate variability. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 285(5), R927-R931. DOI: 10.1152/ajpregu.00452.2003
- Storniolo, J. L., Correale, L., Buzzachera, C. F., & Peyré-Tartaruga, L. A. (2025) Editorial: New perspectives and insights on heart rate variability in exercise and sports. *Front. Sports Act. Living*, 7, 1574087. DOI: 10.3389/fspor.2025.1574087
- Sundas, A., Contreras, I., Navarro-Otano, J., Soler, J. I., Beneyto, A., & Vehi, J. (2025). Heart rate variability over the decades: a scoping review. *PeerJ*, 13, e19347. DOI: 10.7717/peerj.19347
- Taj-Eldin, M., Ryan, C., O'Flynn, B., & Galvin, P. (2018). A review of wearable solutions for physiological and emotional monitoring for use by people with autism spectrum disorder and their caregivers. *Sensors*, 18(12), 4271. DOI: 10.3390/s18124271
- Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. (1996a). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation*, 93(5), 1043-1065. DOI: 10.1161/01.CIR.93.5.1043
- Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. (1996b). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. *European Heart Journal*, 17, 354-381.
- Thayer, J. F. (2002). Progress in the analysis of heart-rate variability. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 21(4), 22-23. DOI: https://doi.org/10.1109/MEMB.2002.1032634
- Thielmann, B., Pohl, R., & Böckelmann, I. (2021). Heart rate variability as a strain indicator for psychological stress for emergency physicians during work and alert intervention: a systematic review. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 16(1). DOI: 10.1186/s12995-021-00313-3
- Vovkanych, L. S., & Kachmar, P. (2013). Typologichni osoblyvosti variabelnosti sertsevoho rytmu yunykhn vesluvalnykiv na kanoe [Typological features of heart rate variability in young canoeists]. *Fizychna aktyvnist, zdorovia i sport* [Physical activity, health and sport], 13(3), 60-70. Retrieved from https://sportsmedicine.ldufk.edu.ua/index.php/fazis/article/view/142/136 [in Ukrainian].
- Vovkanych, L., Boretsky, Y., Sokolovsky, V., Berhtraum, D., & Kras, S. (2020). Validity of the software-hardware complex "Rytm" for measuring the RR intervals and heart rate variability at rest. *Journal of Physical Education and Sport*, 20(3), 1599-1605. DOI:10.7752/jpes.2020.03218
- Vovkanych, L., Boretsky, Y., Sokolovsky, V., Berhtraum, D., & Kras, S. (2021). Validation of the software-hardware complex "Rytm" for measurement of the RR intervals and heart rate variability analysis during exercise and recovery period. *Teoriya ta Metodika Fizichnogo Vikhovannya* [Physical Education Theory and Methodology], 21(1), 61-68. DOI: https://doi.org/10.17309/tmfv.2021.1.08
- Wang, Z., Zou, Y., Liu, J., Peng, W., Li, M., & Zou, Z. (2025). Heart rate variability in mental disorders: An umbrella review of meta-analyses. *Translational Psychiatry*, 15, 104. DOI: 10.1038/s41398-025-03339-x
- Welsh, M. R., Mosley, E., Laborde, S., Day, M. C., Sharpe, B. T., Burkill, R. A., & Birch, P. D. J. (2023). The use of heart rate variability in esports: A systematic review. *Psychology of sport and exercise*, 69, 102495. DOI: 10.1016/j.psychsport.2023.102495
- Yang, F., Ma, Y., Liang, S., Shi, Y., & Wang, C. (2024). Effect of Exercise Modality on Heart Rate Variability in Adults: A Systematic Review and Network Meta-Analysis. *Reviews in Cardiovascular Medicine*, 25(1). DOI: 10.31083/j.rcm2501009
- Zhang, E., Liang, S., Sun, T., Xu, J., Lu, F., Wu, D. ... Ma, W. (2023). Prognostic value of heart rate variability in atrial fibrillation recurrence following catheter ablation: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in cardiovascular medicine*, 9, 1048398. DOI: 10.3389/fcvm.2022.1048398

HEART RATE VARIABILITY: MODERN APPROACHES AND PROSPECTS OF USE IN SPORTS, MEDICINE AND BIOLOGY

Vovkanych L.¹, Fedkiv M.²

¹Ivan Boberskyi Lviv State University of Physical Culture

²Ivan Franko National University of Lviv

In recent years, there has been a growing interest in the use of non-invasive methods for assessing the functional state of the human body in medicine, sports, and professional activities. One of the most powerful tools for such monitoring is heart rate variability (HRV) analysis, which reflects the effectiveness and tension of regulatory systems, physiological adaptation levels, and the body's response to exercise. This review presents current understanding of the HRV analysis methodology, including temporal, geometric, spectral and nonlinear methods. The advantages and limitations of each method are discussed, alongside the importance of data quality, recording standardization, and controlling external factors that may affect reliability. Particular emphasis is placed on the application of HRV in sports physiology for monitoring training adaptation, recovery status, and overtraining prevention. It is shown that adaptation to physical exercise is accompanied by increases in HRV parameters such as SDNN, RMSSD, HF power, and SD1. HRV is highlighted as a multidisciplinary tool effective in cardiology, psychophysiology, sports science, and occupational medicine. The article summarizes contemporary findings on the practical value of HRV metrics for dynamic monitoring of the human functional state.

Key words: heart rate variability, physical exercise, monitoring, adaptation, regulatory systems.