

ВАРІАБЕЛЬНІСТЬ СЕРЦЕВОГО РИТМУ У СПОРТСМЕНІВ

HEART RATE VARIABILITY IN ATHLETES

Мицкан Б. М.¹, Остап'як З. М.¹, Мицкан Т. С.¹, Коробейніков Г. В.², Дрозд С.³, Цинарський В. Я.³

¹Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника

м. Івано-Франківськ, Україна

²Національний університет фізичного виховання і спорту України

м. Київ, Україна

³Жешувський університет,

м. Жешув, Республіка Польща

DOI <https://doi.org/10.32782/2522-1795.2022.12.18>

Анотації

Мета. Аналіз фізіологічних основ і оцінки ефективності застосування показників варіабельності серцевого ритму у спортсменів.

Методи. Системно-функціональний аналіз спеціальної літератури та матеріалів мережі Інтернет ((PubMed, Google Scholar)) за останні десять років.

Результати. Науковий доробок щодо вивчення варіабельності серцевого ритму у спортсменів є доволі значним. Регулярні заняття фізичними вправами та спортом сприяють функціональним та структурним змінам центральних та периферичних механізмів роботи серцево-судинної системи. У дослідженнях, що порівнюють варіабельність серцевого ритму між малорухливими та активними суб'єктами або спортсменами різних видів спорту, показано різні профілі варіабельності серцевого ритму, що говорить про можливість моніторингу показників ВСР для покращення фізичних та фізіологічних станів. Варіабельність серцевого ритму відразу після фізичного навантаження відображає характерні реакції, які вказують, чи навантаження відповідає атлетичній підготовленості спортсмена, але у спортсменів високої кваліфікації на витривалість та/або спортсменів з багаторічною історією тренувань, алгоритм змін показників варіабельності серцевого ритму не завжди відповідає загальноприйнятим. Інтенсивність вправ є основним фактором, що впливає на варіабельність серцевого ритму, при цьому більша інтенсивність викликає нижчу варіабельності серцевого ритму під час фізичного навантаження, а об'єм м'язів, які приймають участь при тренуванні / або енерговитрати є визначальними факторами парасимпатичної реактивації після тренування. «Повна автономна дистонія» у більшості спортсменів з перетренуванням відображає більш розвинуту стадію дезадаптації, пов'язану з пригніченою регуляторною функцією автономної нервової системи, як симпатичного, так і вагусного впливу.

Висновок. Отже, на сьогодні недостатньо експериментальних робіт, які могли б пояснити механізми змін варіабельності серцевого ритму при інтенсивних і тривалих тренуваннях у спортсменів високої кваліфікації. Про те, це дало б змогу розширити застосування результатів діагностики варіабельності серцевого ритму у спортсменів для планування тривалості, частоти та інтенсивності фізичних навантажень.

Ключові слова: варіабельність серцевого ритму, спортсмени, тренування, фізичні навантаження, втома.

Purpose – analysis of physiological bases and evaluation of the effectiveness of the application of heart rate variability indicators in athletes.

Methods. System-functional analysis of special literature and materials of the Internet (PubMed, Google Scholar) for the last ten years.

Results. The scientific achievements in the study of heart rate variability in athletes are quite significant. Regular exercise and sports contribute to functional and structural changes in the central and peripheral mechanisms of the cardiovascular system. Studies comparing heart rate variability between sedentary and active subjects or athletes in different sports have shown different heart rate variability profiles,

suggesting the possibility of monitoring heart rate variability performance to improve physical and physiological conditions. Heart rate variability performed immediately after exercise reflects the characteristic reactions that indicate whether the load corresponds to the athletic training of the athlete, but in athletes with high endurance skills and / or athletes with a long history of training, the algorithm of changes in heart rate variability does not always correspond. Exercise intensity is a major factor influencing HRV, with greater intensity causing lower heart rate variability during exercise, and the volume of muscles involved in training and / or energy expenditure being determinants of parasympathetic reactivation after exercise. "Complete autonomic dystonia" in most athletes with overtraining reflects a more advanced stage of maladaptation associated with suppressed regulatory function of the autonomic nervous system, both sympathetic and vagal effects.

Conclusion. Thus, today there are not enough experimental works that could explain the mechanisms of changes in heart rate variability during intense and prolonged training in highly qualified athletes. However, this would make it possible to expand the application of the results of the diagnosis of heart rate variability in athletes to plan the duration, frequency and intensity of physical activity.

Key words: heart rate variability, athletes, training, physical activity, fatigue.

Вступ

Сучасний етап дослідження варіабельності серцевого ритму (BCP) розпочався в 1965 р., коли дослідники Hon EH, Lee ST. [1] відзначили, що стану дистресу плода передувала альтернація інтервалів між серцевими скороченнями до того, як відбулися будь-які помітні зміни в серцевому ритмі. Лише через 12 років був виявлений взаємозв'язок вищого ризику смерті у хворих, які перенесли інфаркт міокарду зі зниженою BCP [2].

У 1996 р. робоча група експертів Європейського товариства кардіологів і Північно-американського товариства кардіостимуляції та електрофізіології розробила стандарти використання показників BCP у клінічній практиці, відповідно до яких нині виконується більшість досліджень. Оптимальний рівень BCP в організмі відображає здорову функцію та властиву їй само регуляційну здатність, адаптивність або стійкість. Для визначення BCP рекомендується використовувати ряд методів, що забезпечують найбільш повний аналіз при мінімальних витратах методів і часу. Крім рекомендацій щодо вибору методу оцінки BCP, у документі наведено вимоги до процедури виміру всіх параметрів, що впливають на визначення BCP [3]. BCP в першу чергу застосовувались для прогнозування раптової серцевої смерті та діабетичних невропатій при оцінці прогресування хвороби, а пізніше почали використовувати в кардіології, неврології, пульмонології, психології, при захворюваннях крові, нирок тощо [4].

Велика кількість оригінальних та оглядових статей з моніторингу BCP, опублікованих за останні десятиліття, підтверджує високий інтерес дослідників до вивчення даного показника функціонування серця при фізичних навантаженнях, особливо в спорті [5,6].

Мета.

Аналіз фізіологічних основ і оцінки ефективності застосування показників варіабельності серцевого ритму у спортсменів.

Методи.

Для реалізації мети дослідження був використаний системно-функціональний аналіз спеціальної літератури та матеріалів мережі Інтернет (PubMed, Google Scholar) за останні десять років.

Результати.

Науковий доробок щодо вивчення варіабельності серцевого ритму у спортсменів є доволі значним. Регулярні заняття фізичними вправами та спортом сприяють функціональним та структурним змінам центральних та периферичних механізмів роботи серцево-судинної системи. У дослідженнях, що порівнюють BCP між малорухливими та активними суб'єктами або спортсменами різних видів спорту, показано різні профілі BCP, що говорить про можливість моніторингу показників BCP для покращення фізичних та фізіологічних станів [38,54]. Незважаючи на застосування різних методик, основними статистичними результатами, були вищі середні значення SDNN, Індекс SDNN, pNN50, RMSSD, SDNN, SDRR та HF, падає потужність спектра LF у групі активно фізичних

людей і спортсменів [32,38,55]. У високо тренуваних спортсменок в стані спокою можливий перехід до максимальної парасимпатичної регуляції ритму з інгібіцією симпатичних впливів [32]. Після закінчення фізичного навантаження у спортсменів незначно підвищуються LF та HF порівняно з фізичними активними, проте LF/HF не відрізнявся [56] і швидше, ніж у здорових нетренованих осіб повертаються до норми [38,57], але суттєвих відмінностей між спортсменами високої кваліфікації та спортсменами рекреаторами не виявлено [36]. В той же час, систематичний аналіз [58] виявив, що фізичні навантаження мають мінімальний вплив на серцевий вегетативний контроль здорових людей, але призводить до поліпшення автономного контролю серця хворих.

Хоча існують помітні фізичні та фізіологічні відмінності між спортсменами, які тренуються в різних видах спорту, можливість застосування ВСР при такій різноманітності ґрунтується на тому, що вегетативна регуляція серцево-судинної системи є важливим фактором адаптації до тренувань, перш ніж наступить тренувальний ефект. Оптимальне тренування залежить від відповідності конкретним здібностям спортсмена, таких як м'язова сила, витривалість, гнучкість та пристосованість до аеробних можливостей індивіда, тренувального навантаження та відновлення. Використання ВСР є оптимальним рішенням, яке відображає основні регуляторні процеси після фізичних вправ [11,59,60,61]. Дискусійним є питання, чи впливають на ВСР тільки аеробні, а й анаеробні вправи, але більшість дослідників вважають, що зміни показників є, але вони можуть відрізнятися між спортсменами різної направленості [14].

Як показали Kaikkonen P, et al. [52], ВСР проведена відразу після фізичного навантаження відображає характерні реакції, які вказують, чи навантаження відповідає спортивній підготовленості спортсмена. На початку фізичних навантажень інтервали RR стають коротшими та більш рівномірними, що виникає внаслідок посилення симпатичної активності та зменшення впливу парасимпатичної

системи. На початковому рівні LFn дещо збільшується, ніж HFn. Співвідношення LF/HF з часом збільшується і відображає симпатичний тонус (підвищення LFn) та зниження парасимпатичного впливу (зниження HFn) [63,64], а lnRMSSDCV змінюється пропорційно збільшенню або зменшенню навантаження при одноразових і передсезонних тренуваннях у хокеїстів [28], аналогічні зміни LnRMSSD виявлені у спортсменів олімпійської команди з регбі [65], у веслувальників на тренувальному зборі, коли навантаження було на 76% більше, чим звичайне – зниження показників(RMSSD і SD1), а SDNN залишався зниженим ще тиждень [66], у чоловіків каноїстів під час 10-ти денного тренувального табору [67], у атлетів кікбоксингу [68], велосипедистів [69], біатлоністів [70], гравців з фут залу [71]. А у іншій роботі у футболістів констатували тільки незначні коливання Δ Lp RMSSD та Δ SDNN при фізичних навантаженнях [72].

У ряді досліджень у спортсменів високої кваліфікації на витривалість та/або спортсменів з багаторічною історією тренувань, часовий перебіг серцевої парасимпатичної активності протягом всього тренувального плану не завжди відповідав цим тенденціям, особливо на останніх етапах тренування, без очевидних ознак втоми при цьому [11,73, 74].

Інтенсивність вправ є основним фактором, що впливає на ВРС, при цьому більша інтенсивність викликає нижчу ВСР під час фізичного навантаження в порівнянні з середньо-високою інтенсивністю, і з мінімальними змінами в міру подальшого збільшення інтенсивності. Взагалі, інтенсивність тренувань є ключовим фактором зміни вегетативної активності серця після аеробно-орієнтованих вправ (чим вище інтенсивність, тим довше гомеостатичне зрушення) і є більш впливовим, ніж тривалість [75,76].

При дослідженні впливу силових та високо інтенсивних інтервальних тренувань на вегетативну модуляцію серця у добре підготовлених спортсменів по LnRMSSD під час ортостатичного тесту рееструються різні вегетативні реакції при різних фізичних наванта-

женнях, які не можуть бути виявлені лише лежачи на спині або у вертикальному положенні і при цьому пропонується використовувати середні дані 2-4 днів, а не одноразові показники [77]. Коробейникова ЛГ. і др. [78] додатково пропонують ортостатичне навантаження для визначення ступеня напруження регуляторних систем організму у спортсменів із оптимальною реакцією. У спортсменів з реакцією перенапруження при ортостатичному навантаженні виявляється переважання над низькочастотних компонентів за рахунок симпатичного впливу.

Систематичний (27 робіт) та метааналіз (24 дослідження) оцінки адаптації і дезадаптації до тренувань на витривалість показав, що при підвищенні продуктивності в спокої у спортсменів є невелике підвищення RMSSD, HF та SD1, і помірне збільшення після тренувань SD1. В роботах, при яких є зниження працездатності, показали невелике збільшення RMSSD у спокої, але не HF та SD1, після тренування RMSSD, HF були збільшені. Однак збільшення частоти BCP після тренування також виникає у відповідь на перенавантаження, демонструючи, що можуть бути необхідні додаткові маркери, щоб визначити пов'язані з навчанням зміни цих параметрів з позитивними чи негативними адаптаціями [79]. Зниження LnRMSSD одночасно зі зменшенням співвідношення LnRMSSD/RR вказує на парасимпатичне насичення, незважаючи на зниження LnRMSSD [80]. Дослідження Wang X., Yan C., Shi B., Liu C., Karmaakar C., [103] взагалі не виявило зв'язку між навантаженням/інтенсивністю тренувань та BCP. Ці результати підтверджують, що комбінацію показників слід використовувати для моніторингу вегетативної активності серця у спортсменів [80].

Повне серцеве вегетативне відновлення вимагає до 24 год після низької інтенсивності, 24–48 год після порогової інтенсивності та щонайменше 48 год після вправ високої інтенсивності на витривалість [75]. Після фізичних навантажень відновлення проходило довше при аеробних навантаженнях чим при силових [81]. Порівнюючи різні

види навантажень, виміряних у часовій або частотній областях у спортсменів командних видів спорту під час звичайних тренувань і при відновленні демонструють послідовно позитивні асоціації із зовнішніми навантаженнями та інтенсивністю, але величина та невизначеність цих взаємозв'язків залежать від дози та режиму тренувань [75,82,83], а також від рівня працездатності спортсмена [22]. Зокрема, спортсмени показали повільніше повернення парасимпатичної активності під час термінового відновлення після інтервального (інтенсивного) методу тренувань відносно постійної інтенсивності вправ. На відміну від цього, пізніше відновлення через 24 та 48 год після припинення вправи не залежало від типу вправ (інтервальне або постійне навантаження)[63]. У роботі Thamm A, et al. [96] RMSSD знижувався після гіпертрофічного та максимального силового тренування, незалежно від типу навантаження. Крім того, всі показники BCP знижувались до базової лінії протягом 30 хвилин після тренування і автори роблять висновки про слабкий зв'язок BCP при відновленні. Не зовсім зрозумілі зміни BCP у жінок велосипедистів, які брали участь в багатоденній гонці: найбільша зміна балансу BCP спостерігалася на другий день після найбільшого відносного фізичного навантаження. Середні значення варіабельності серцевого ритму повернулися до базових значень через тиждень після завершення гонки. Незважаючи на неповне відновлення, по даним BCP від дня в день, втота не була сумарною [85]. Поки не зрозуміло, як тривалість фізичних вправ впливає на BCP під час відновлення після тренування. Дослідження показують, що 100% збільшення тривалості фізичних вправ не змінює BCP під час негайного відновлення [86], але дослідження [87] виявило, що відновлення BCP сповільнилося після збільшення тривалості фізичних вправ на 300–400% (з ~ 20 до ~ 90 хв). Можна припустити, що тривалість фізичних вправ повинна бути продовжена понад деякий критичний термін (відносний чи абсолютний), перш ніж може спостерігатися вплив на відновлення BCP, і цим може перший поріг

вентиляції, тобто, навантаження нижче цієї інтенсивності приводить до швидкого відновлення, тоді як вище – до затримки відновлення і не залежить від інтенсивності (принаймні у висококваліфікованих спортсменів), однак це залишається дискусійним [83].

Дуже мало дослідників вивчали відновлення ВСР після фізичного навантаження для різних видів "аеробних" вправ. Cunha F.A, et al. [21] досліджували період швидкого відновлення після поетапного здійснення трьох способів: ходьби, їзди на велосипеді та бігу. Протягом 5-ти хвилинного періоду відновлення RMSSD було більш швидким після фізичних вправ, пов'язаних з меншою м'язовою масою або витратою енергії, тобто на велосипеді > ходьбі > бігу, тому автори зробили висновок, що об'єм м'язів / або енерговитрати є визначальними факторами парасимпатичної реактивації після тренування. Останнє тлумачення узгоджується з висновками дослідження, яке демонструє ступінчасту реакцію після трьох різних інтенсивностей фізичних вправ [89]. Порівняння статичних вправ (ізометричне розгинання коліна при 30% MCV) з динамічними вправами (їзда на велосипеді при 30 і 60% VO₂ макс.) показало, що часові та частотні доменні показники ВСР знижувались під час динамічних фізичних вправ, тоді як під час статичних вправ спостерігалось збільшення показників [90].

В останні роки широко почали вивчати ВСР в діагностиці перетренування і втоми. Збільшення інтенсивності та обсягу тренувань зазвичай здійснюються тренерами та спортсменами, намагаючись підвищити фізичну працездатність. Однак, коли баланс між відповідним тренувальним стресом і адекватним відновленням, порушений, може виникнути патологічна відповідь на тренування – функціональне перенапруження (f-OR). Коли "посилене тренування" триває, у спортсменів настає стан нефункціонального перенапруження (nf-OR) або перетренування, що призведе до застою або зниження продуктивності, яке не відновиться протягом декількох тижнів чи місяців [74]. На противагу стадії nf-OR, f-OR часто свідомо

індексується тренерами через періоди посилених тренувань, таких як періоди тренувальних таборів, з наміром, щоб тимчасове зменшення ефективності супроводжувалося супер компенсацією. Тому важливо визначити, не втручаючись у тренувальний процес, маркери, які можуть ефективно ідентифікувати спортсменів, які погано адаптуються до фізичних навантажень. Незважаючи на свою популярність, докази, що підтверджують максимальну реакцію на тренування після навмисного f-OR, не є зрозумілими. Дослідження дали суперечливі результати, при цьому в деяких роботах настає повільніше відновлення, а інших – пришвидшене ВСР у спортсменів, у яких є підозра на f-OR [91]. Aubry A, et al. [3] показали, що у спортсменів після 3-тижневого тренування з перевантаженням була нижча ефективність, порівняно з групою добре підготовлених триатлоністів, які закінчили таке ж посилене тренування без ознак і симптомів f-OR. При розгляді значень, отриманих один раз на тиждень, чіткого впливу f-OR на параметри ВСР не виявлено. На противагу цьому, середньо тижневий середній показник кожного показника ВСР показав більшу зміну показників парасимпатичного тону в групі f-OR, ніж у контрольній групі в положенні лежачи і дійшли до висновку, що прогресуюче зростання парасимпатичної активності спокою (ранкова) у спортсменів на витривалість є показником f-OR, тоді як стресова реакція на перетренування і функціональне перенапруження з домінантою симпатичного впливу розцінюється як ознака психічної або фізичної втоми і одним із механізмів є зниження активності хеморефлексу за рахунок накопичення метаболітів після фізичного навантаження [74]. Під час 2-х тижневого перенавантаження у футболістів зі зниженим lnRMSSDmean та збільшеним lnRMSSDcv мали негативну адаптацію у відповідь на вище тренувальне навантаження, при зменшенні навантаження відповідні зміни були зворотні [92]. Спортсмени в стані перетренованості можуть виявити значне зменшення змінних частотних областей (TP, LF і HF) і часових областей

(RMSSD і SDNN) [93]. Як правило, низький тонус блукаючого нерву пов'язаний з поганою адаптацією і це може бути показником перетренованості [32,38], так як і "повна автономна дистонія" у більшості спортсменів з перетренованням відображає більш розгорнуту стадію дезадаптації, пов'язану з пригніченою регуляторною функцією АНС, як симпатичного, так і вагусного впливу і мінливість серцевого ритму може надати корисну інформацію при виявленні перетренованості у спортсменів і є цінним суміжним інструментом для оптимізації тренувальної програми спортсмена [31,93,94]. І в даному випадку фахівці пропонують для оцінки перетреновання, втомити використовувати кілька маркерів, а також враховувати конкретну фазу тренування [34,91,95].

Ще один напрямок застосування показників ВСР – прогнозування спортивних травм. У спортсменів CrossFit™ ризик травм був істотно підвищений, коли спостерігалися тижневі «низькі» значення LnRMSSD при високих навантаженнях, але вони добре переносилися, в порівнянні, коли тижневий LnRMSSD був «нормальним» або «високим», у плавців прогресивна активація симпатичної нервової системи (збільшення RMSSD) теж зв'язана з більшою частотою спортивних травм [96,97].

Участь юних спортсменів у чисельних змаганнях стає все більш поширеним явищем і це викликає занепокоєння щодо появи перетренованості та спортивних травм. Як відомо, значення парасимпатичного показника (тобто HF), не проявляє змін до статевої зрілості, а потім зменшується у віці 14–22 роки, підлітки чоловічої статі демонстрували більш високі значення SDNN, RMSSD, pNN50, HF та LF порівняно з дівчатами [98]. А як у спортсменів?

У підлітків плавців тренування на швидкість на протязі 20 тижнів було пов'язано з прогресивною активацією симпатичної нервової системи (збільшення RMSSD), тоді як тренування на витривалість не показало значних змін показників ВСР [96], а асоціації з тренувальним навантаженням та трива-

лістю сну у молодих плавців протягом 11-ти тижневого періоду показала, що щоденна ВСР не суттєво корелює з обсягом тренувань або тривалістю сну, і має обмежене значення для кількісного визначення балансу між величиною фізичного навантаження та толерантністю молодих спортсменів, тоді як при різко підвищеному або розширеному тренувальному навантаженні нижча ВСР стає важливим показником потенційної перетренованості [99]. У юних дзюдоїстів було доведено позитивний вплив фізичних навантажень на кардіо-респіраторну систему і організм в цілому по показникам ВСР [100]. У дівчат-веслярів навантаження під час тренувального табору було на 76% вище звичайного: RMSSD і SD1 була значно знижені протягом кожного дня тренування у порівнянні з базовим рівнем навчання, хоча повернулася до базової лінії протягом тижня тренувального табору. Цікаво, що рівень SDNN зменшувався протягом усього тренувального табору і залишався зменшеним ще тиждень після тренувального табору і автори рекомендують використання показників ВСР, що дозволить чітко налаштувати тренування, потенційно підвищуючи результативність у молодих спортсменів [66]. Аналогічні зміни виявлені у юнаків і дівчат-каноїстів, лижників [67,101].

Потрібно відмітити, що не завжди показники ВСР співпадали з іншими маркерами фізичного навантаження та відновлення. Так, порівняння показників ВСР з лабораторними тестами, у важкоатлетів після 2-х годинного інтенсивного фізичного навантаження парасимпатична потужність повернулася до вихідних даних через 24 год і збільшувалася протягом 48-72 год, тоді як лабораторний показник (DHEA-S) повернувся до нормальних величин через 48 год [102], аналогічна динаміка була у регбістів [95], після ультрамарафону (64 км) – перцептивна втома та біль м'язів потребували до 5 днів відновлення, щоб повернутися до вихідного рівня [103]. Психологічне відновлення (опитувальник RESTQ-36-R-Sport) та lnRMSSD не відповідають одній і тій же динаміці [104]. Не було зв'язку між ВСР в частотній області і креатинкіназою у спортсменів під час

максимальних фізичних навантажень [84]. Але збільшення біомаркерів пошкодження серця в учасників ультрамарафону (118 км) корелювало з показниками ВСР і автори рекомендують використовувати для оцінки спортсменів на ультравитривалість [105], у професійних баскетболістів – з VO_2 , а у велосипедистів і з порогом вентиляції легень, який можна використовувати без застосування дорогих ергоспірометричних та інвазивних методик [50,63,69]. Тест Yo-Yo IR1 та показники ВРС у спокої корелюють з показником працездатності. Якщо суб'єктивна оцінка сну, відчуття втоми, біль м'язів та настрою за самозвітами (ASRM) щодня протягом 4 тижнів серед плавців-спринтерів була кращою за середню, то був підвищений LnRMSSD. Тест Хупера не співпадав з показниками ВРС у футболістів при втомі і був більш чутливий. ВРС у велосипедистів корелювала зі швидкістю сприйнятого напруження, балом тренувального імпульсу та «пройденими» кілометрами [85]. Авторегресивна модель оцінки ВРС дозволило виключити вплив фізичної активності та виявило, що метаболічні зміни у спортсменів асоціюються знизженням парасимпатичного тону [49].

Відомо, що на процес відновлення після фізичного навантаження впливає вологість повітря. Вимірювання ВРС повторювали через 2, 4, 8 та 24 години в гарячих і сухих (високій температурі – 38 С та 28% відносній вологості) та гарячих і вологих умовах (38 С та 64% відносної вологості). ВРС по LnRMSSD і та LF / HF, відновилися до базових значень швидше після фізичних навантажень у сухих умовах (4 год), ніж у вологих умовах (між 8 та 24 год), але у чоловіків-велосипедистів після сауни при звичайних тренуваннях протягом 10 днів спричинили незрозумілі зміни ВРС і потребує дальнішого з'ясування.

Є спроби диференціювати зміни ВРС у спортсменів різних видів спорту. У спортсменів ігрових видів спорту (баскетбол, волейбол, футбол) виявлено домінуючу роль симпатичної ланки вегетативної регуляції серця по таким показникам -TP (загальна потужність спектру), HF, LF, SI – індекс напруження

Р.М. Баєвського, у спортсменів-легкоатлетів (спринт, стаєри, спортивна ходьба) виявлено переважання парасимпатичної ланки регуляції над симпатичною [59]. Деякі параметри були вищими у каноїстів-каяків і велосипедистів, ніж бігунів [55]. Оцінюючи спортсменів-чоловіків (бігунів, велосипедистів), показано, що вид спорту впливає на рівень брадикардії в спокої та механізми контролю у професійних спортсменів. «Відпочинкова» брадикардія у бігунів, в основному, залежить від вегетативного механізму, на відміну від цього, брадикардія у спокої велосипедистів спирається на неавтономний механізм, ймовірно, пов'язаний із гіпертрофією серцевого м'язу/ Неоднозначні результати показників ВРС при травмі голови (струс мозку). Лінійні та нелінійні параметри ВРС у спортсменів після струсу мозку (95 днів \pm 63) під час фізичних навантажень демонстрували значно меншу потужність у діапазонах HF, що приводило до значно вищого співвідношення LF/HF і «безсимптомні» спортсмени демонструвати зміни в серцевій вегетативній модуляції тижнями-місяцями після травми [51]. Але в той же час Huang M. et al. [48] рекомендують вже через 4 дні після струсу мозку когнітивні завдання для пришвидшення повернення до ігор командних спортсменів, але загальний висновок фахівців – ВРС може допомогти діагностувати та дати зрозуміти про безпечне повернення до гри спортсменів після травми голови [45,98].

Тест Фрідмана показав значний вплив завдань різної складності у 16-ти шахістів чоловіків на показники ВРС. Знизження ВРС спостерігалося в групах з високою і низькою ефективністю вирішення завдань, але було значно вищим у групі з високою ефективністю, ніж у групі з низькою продуктивністю під час шахових завдань по нелінійним показникам і може бути цікавим і корисним інструментом у шаховій підготовці [48].

Дискусія.

Як показав огляд, є значна кількість публікацій про роль ВРС, як інструменту для коригування тренувального навантаження, діагностики та запобігання втоми, оцінки перетренованості та аеробних можливостей,

а також як маркера саморегуляції, так як інші різноманітні методики моніторингу у очікуваній та фактичній ефективності склали 23% та 20% відповідно до профілактики травм та підвищення ефективності тренування. Основна перевага ВСР полягає в тому, що вона неінвазивна, не дорога, ефективна у часі і може застосовуватися рутинно та одночасно у великій кількості спортсменів. Як зазначають Morgan S. J., [70] у 85,71% робіт спортсмени покращили психофізіологічні показники, що дозволило їм підвищити свої спортивні результати завдяки тренуванню під контролем ВСР. Незважаючи на обмежену кількість експериментальних досліджень у цій галузі на сьогоднішній день, результати свідчать про те, що біологічна зміна частоти серцевих скорочень є ефективним, безпечним та легким для засвоєння методом і для спортсменів, і для тренерів з метою покращення спортивних показників, але моніторинг ВСР все ще не сприймається як «золотий стандарт», ймовірно, через суперечливі висновки наукових досліджень, методологічними розбіжностями або частково неправильним трактуванням результатів [7,25,34].

Розглянемо деякі із них, які на думку фахівців, приводять до суперечливих результатів ВСР у спортсменів.

Важливий комплексний підхід до оцінки тренувального навантаження, і з цієї причини внутрішні та зовнішні тренувальні навантаження повинні використовуватись у поєднанні, щоб забезпечити більш глибоке розуміння тренувального процесу. Метарегресія виявила значні зміни ВСР від віку, статі, умов навколишнього середовища, тип дихання та тривалості запису для аналізу у спортсменів [29]. Детермінанти ВСР після фізичного навантаження теж є множинними і включають регуляцію артеріального тиску, барорефлекторну активність та особливо стимуляцію метаболічного рефлексу після фізичного навантаження, що призводить до симпатичної відміни та парасимпатичної реактивації [75]. Чим більша відносна інтенсивність фізичних вправ, тим більший ацидоз крові та стимуляція метаболічного рефлексу, тим нижчі показники ВСР, пов'язані

з вагусом. Для оцінки «справжніх» автономних впливів на серцевий ритм, незалежний від стимуляції метаболічного рефлексу, було запропоновано використання лише субмаксимальної вправи ($\leq VT1$), але на сьогодні з допомогою нелінійних методів ВСР є спроби виокремити метаболічні зміни [23].

У командних видах спорту практична реалізація систем моніторингу спортсменів створює особливу проблему через складну та багатовимірну структуру вимог до гри, велика кількість гравців та напружені тренування та графіки змагань. Однак всебічний і змістовний моніторинг тренувального процесу вимагає точного розділення різних типів відповідей, таких як перенапруження, відновлення та адаптація, що може вплинути на заходи серцевого ритму. Тому додаткова інформація про тренувальний контекст (наприклад, фаза тренування, тренувальне навантаження та розподіл інтенсивності) у поєднанні з багатоваріантним аналізом, який включає маркери (сприйнятого) стану здоров'я та втоми, слід враховувати при тлумаченні змін показників серцевого ритму [24]. Щоденний аналіз ВСР з використанням 5-хвилинного періоду стабілізації та 5-хвилинного періоду запису займає 70 хв на тиждень, що може вважатися трудомістким. Ця проблема на сьогодні вирішена: зменшення кількості обстежень ВСР на тиждень (трьох аналізів ВСР на тиждень достатньо для тренуваних спортсменів, але п'ять аналізів на тиждень потрібно спортсменам-рекреаторам); застосуванням ультракоротких ВСР (1 хв після 1хв стабілізації), що дозволяє виявити адаптацію до тренування; поява портативних пристроїв, які демонструють невелику кількість абсолютної помилки порівняно з ЕКГ і можна застосовувати у спортсменів [25,27]. Найчастіше з 70-ти змінних ВСР у спорті застосовуються показники часового та спектрального аналізу [28]. Чутливість RMSSD та SD1 до дихання дуже низька, що добре підходить для щоденного моніторингу при спонтанному диханні спортсменів [29], оскільки RMSSD можна вирахувати за допомогою електронної таблиці Excel, він не потребує будь-якого

складного програмного пакету і тому більш доступний, а $\ln\text{RMSSDCV}$ збільшується або зменшується пропорційно збільшенню або зменшенню фізичного навантаження. Однак, якщо RMSSD може допомогти фахівцям визначити глобальний рівень «втоми», він не дозволяє дискримінувати різні типи втоми. Останні результати при застосуванні спектрального аналізу ВСР наголошують на тому, що профілі ВСР, оцінені в лежачих та стоячих положеннях, є незалежними та взаємодоповнюючими і використання цих постральних профілів дозволяє згрупувати різні під категорії "втоми" [30]. Але, як показали результати огляду, що оцінка $\ln\text{RMSSD}$ сама по собі може вводити в оману через можливу присутність явища парасимпатичного насичення, зокрема у спортсменів з дуже високою серцевою вагусною активністю. Явище насичення ймовірно, викликане нелінійною реакцією ацетилхоліну на синоатріальний вузол.

Нелінійні методи, дещо складніші у використанні, і отримали певний інтерес останнім часом і можуть надавати більш цінну інформацію, про перехід до не вегетативного контролю при інтенсивних фізичних навантаженнях. Кожен індекс фіксує різну особливість АНС, причому деякі показники швидше відображають серцеву симпатичну активність, а інші – серцево-парасимпатичну активність. Дослідження нелінійних і лінійних методів аналізу ВСР показали зміни показників в залежності від частоти серцевих скорочень і рекомендують проводити корекцію з урахуванням ЧСС [31], а також нові математичні алгоритми аналізу ВСР дозволяють індивідуалізувати підхід до тренувань, орієнтуючись на найбільш сприятливий симпатико-парасимпатичний баланс [32].

Чи виявляють записи ВСР у вертикальному положенні додаткову інформацію в порівнянні із на спині, наразі, незрозуміло. Положення на спині максимально підвищує парасимпатичний тонус, що важливо для спостереження при безперервному аеробному навантаженні, однак, це не стосується командних видів спорту, які покладаються на анаеробні інтервальні періоди, тим самим

посилляють активізацію симпатичного тону та зменшення впливу вагуса. В одних роботах не було виявлено різниці між положенням лежачи або стоячи [33], а в інших – у вертикальному положенні показують більш значну кореляцію з показниками на витривалість. Wang X, et al.[43], аналізуючи різні нелінійні показники після вейвлету при фізичних навантаженнях і стресових станах показали що різні показники ВСР зв'язані з фізичним навантаженням, відновленням, диханням, положенням при записі і потребують додаткових досліджень. Крім того, аналіз ефекту Коена показав, що такі фактори, як модальність спорту, протокол дослідження та обрана одиниця вимірювання, можуть впливати на очікувані результати [38]. Крім того, de Geus E. et al. [24] рекомендують для зменшення похибок при інтерпретації показників ВСР не порівнювати різні одиниці вимірювання, коригувати дані з вагою тіла і віком і запропонували формули для оцінки ВСР для нових показників, які на їхню думку більш валідні.

Однак стан дихання (контрольоване, діафрагмальне, резонансне, вільне) має вплив на заходи частотної області, визиває суперечливі результати показників LF та HF [34,35,36]. Оскільки активність АНС, а отже, показники ВСР визначаються множинними факторами [12,19], щоб подолати деякі з цих обмежень, було запропоновано дослідникам використовувати ортостатичне тестування [76], та застосовувати ковзаючі середні для оцінки адаптації до тренувань [74]. Ще один аспект – це аналіз щотижневих змін та однакові умови тестування (наприклад, через два дні після змагань), що може допомогти мінімізувати гострі «заплутані» результати.

Є досить несподівано, що значення щоденного ВСР ($\ln\text{RMSSD}$) не співвідносилася з тривалістю нічного сну. Однак гіпотетично може бути так, що асоціація була замаскована через час вимірювання ВСР, який відбувся не під час нічного сну, а лише через 2 хв після ранкового пробудження, а можливо, що ВСР є більш чутливим до якості, а не загальної тривалості сну [99]. У спортсменів нічні записи щоденно не можуть бути при-

йнятті, обмежуючи їх корисність. Крім того, рівень активності попереднього дня, як правило, впливає на нічний показник ВСР протягом ранніх годин сну [75]. Потрібно враховувати, що тижневі коливання lnRMSSD в спокої досягають значущості на 5-6 тижнях тренування і в цьому випадку ранкові записи для індивідуальної програми спортсменів можуть бути корисними при тренуванні на витривалість [37].

Різницю парасимпатичних показників ВСР при тривалих тренуваннях у спортсменів високої кваліфікації фахівці намагаються пояснити розподілом тренування і стресом перед змаганнями. Scott M, Graham K.S. [88] пропонують для зменшення похибок одночасний моніторинг ВСР та систолічних часових інтервалів. Laborde S, et al. [61] запропонували теорію «вагального резервуару» для контролю регуляції роботи серця, що, ймовірно, дозволить краще зрозуміти саморегуляцію при фізичних навантаженнях. Слід враховувати, що показники підвищеної працездатності не обов'язково відображають позитивну адаптацію, оскільки перед змагання «готовність» або мотивація на результат може змінювати результати ВСР [11].

Тренування викликає різноманітні адаптаційні реакції на різних рівнях (наприклад,

серцево-судинний, гормональний, нервово-м'язовий, психологічний) і будь-який з них може призвести до зміни продуктивності або втоми, будь то ізольовано чи комбіновано і навряд чи будь-який окремих маркер може точно відображати зміни в багатовимірній конструкції, такі як продуктивність або втома і найкращий варіант – це багатоваріантний підхід моніторингу спортсменів з паралельною перевіркою декількох маркерів і якщо, принаймні 2 з 3-х показують однонаправлені зміни, тоді можна їх інтерпретувати як істотно відхилені [12].

Висновок.

Отже, на сьогодні проведена значна кількість досліджень варіабельності серцевого ритму у спортсменів для оцінки адаптаційних змін в серцево-судинній системі під впливом фізичних навантажень, процесів відновлення, перетренування, але недостатньо експериментальних робіт, які могли би пояснити механізми змін варіабельності серцевого ритму при інтенсивних і тривалих тренуваннях у спортсменів високої кваліфікації. Проте, це дало б змогу розширити застосування результатів діагностики варіабельності серцевого ритму у спортсменів для планування тривалості, частоти та інтенсивності фізичних навантажень.

References

1. Abellán-Aynés, López-Plaza, O.D., Alacid, F. Naranjo-Orellana, J., Manonelles, P. (2019) Recovery of Heart Rate Variability After Exercise Under Hot Conditions: The Effect of Relative Humidity, *Wilderness Environ Med.*, 30(3):260-267. doi: 10.1016/j.wem.2019.04.009.
2. Akenhead, R., Nassis, G.P. (2016) Training load and player monitoring in high-level football: current practice and perceptions, *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 11:587–593. 10.1123/ijspp.2015-0331.
3. Aubry, A., Hausswirth, C., Louis, J., Coutts, A.J., Buchheit, M., Le Meur, Y. (2015) The Development of Functional Overreaching Is Associated with a Faster Heart Rate Recovery in Endurance Athletes, *PLoS One.* 10(10): e0139754. doi: 10.1371/journal.pone.0139754
4. Azevedo, L.F., Perlingeiro, P.S., Hachul, D.T., Gomes-Santos, I.L., Brum, P.C., Allison T.G. (2014) Sport Modality Affects Bradycardia Level and Its Mechanisms of Control in Professional Athletes, *Int J. Sports Med.* 35(11):954-959. DOI: 10.1055/s-0034-1384589.
5. Baek, H.J., Cho, C.H., Cho, J., Woo, J.M. (2015). Reliability of ultra-short-term analysis as a surrogate of standard 5-min analysis of heart rate variability. *Telemed J E Health.* 21:404–14. doi:10.1089/tmj.2014.0104.
6. Ban, A.S., Zahorodnyi, H.M., Petrova, O.V. (2012). Ispolzovanye vehetatyvnoho pokazatelia dlia otsenky varyabelnosti rytma serdtsa sportmenov yhrovykh vydov sporta. *Sovremennye problemy reabylytatsyy u sportyvnoi medytsyny. Materialy Respublykanskoi nauchn.-prakt. konf. – Hrodno: 29–33.*

7. Barrero, A. Schnell, F., Carrault, G., Ker-
vio, G., Matelot, D., Carré, F. et al. (2019). Daily
fatigue-recovery balance monitoring with heart
rate variability in well-trained female cyclists on
the Tour de France circuit. 7;14(3):213472. doi:
10.1371/journal.pone.0213472.
8. Bellenger, C.R., Fuller, J.T., Thomson,
R.L., Davison, K., Robertson, E.Y., Buckley,
J.D. (2016). Monitoring Athletic Training Sta-
tus Through Autonomic Heart Rate Regula-
tion: A Systematic Review and Meta-Analy-
sis. *Sports Med.* 46(10):1461-86. doi: 10.1007/
s40279-016-0484-2.
9. Bellenger, C.R., Karavirta, L., Thomson,
R.L., Eileen, Y., Robertson, E.Y., Davison, K.
et.al. (2016). Contextualizing Parasympathetic
Hyperactivity in Functionally Overreached
Athletes With Perceptions of Training Toler-
ance. *International Journal of Sports Physiology
and Performance.* 11(5):685-692. DOI:[https://
doi.org/10.1123/ijsp.2015-0495](https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0495)
10. Bentley, R.F., Vecchiarelli, E., Banks, L.
(2020). Gonçalves PEO, Thomas SG, Goodman
JM. Heart rate variability and recovery follow-
ing maximal exercise in endurance athletes and
physically-active individuals. *Appl Physiol Nutr
Metab.* 15. doi: 10.1139/apnm-2020-0154.
11. Bhati, P., Moiz, J.A., Menon, G.R., Hus-
sain, M.E. (2019). Does resistance training
modulate cardiac autonomic control? A system-
atic review and meta-analysis. *Clin Auton Res.*
29(1):75-103. doi: 10.1007/s10286-018-0558-3.
12. Bourdon, P.C., Cardinale, M., Murray,
A., Gastin, P., Kellmann, M., Varley, M.C. et.al.
(2017). Monitoring Athlete Training Loads: Con-
sensus Statement. *International Journal of Sports
Physiology and Performance.*12(2):2161-2170
doi: 10.1123 / IJSP.2017-0208.
13. Buchheit, M. (2014). Monitoring train-
ing status with HR measures: do all roads lead
to Rome? *Front. Physiol.* 5:73. doi: 10.3389/
fphys.2014.00073.
14. Campos, L.A., Pereira, V.L., Muralikr-
ishna, A., Albarwani, S., Brás, S., Gouveia, S.
(2013). Mathematical biomarkers for the auto-
nomic regulation of cardiovascular system. *Front
Physiol.* 4:279. doi:10.3389/fphys.2013.00279.
15. Casonatto, J., Tinucci, T., Dourado, A.C.,
Polito, M. (2011) Cardiovascular and autonomic
responses after exercise sessions with different
intensities and durations. *Clinics.* 66:453–458.
10.1590/S1807-59322011000300016.
16. Chen, J.L., Yeh, D.P., Lee, J.P., Chen,
C.Y., Huang, C.Y., Lee S.D. (2011). Parasymp-
athetic Nervous Activity Mirrors Recov-
ery Status in Weightlifting Performance After
Training. *Journal of Strength and Condition-
ing Research.* 25(6):1546-1552 DOI: 10.1519/
jsc.0b013e3181da7858.
17. Coelho, A.B., Nakamura, F.Y., Mor-
gado, M.C., Holmes, C.J., Baldassarre, A., Esco,
M.R., et al. (2019). Heart Rate Variability and
Stress Recovery Responses during a Training
Camp in Elite Young Canoe Sprint Athletes.
Sports (Basel). May 23;7(5). pii: E126. doi:
10.3390/sports7050126.
18. Conder, R.L., Conder, A. (2014). Heart
Rate Variability Interventions for Concussion
and Rehabilitation. *Front Psychol.* Aug 13;5:890.
doi: 10.3389/fpsyg.2014.00890.
19. Coutts, A.J., Crowcroft, S., Kempton,
T. (2018). Developing athlete monitoring sys-
tems: Theoretical basis and practical applica-
tions. In M. Kellmann & J. Beckmann (Eds.),
*Sport, Recovery and Performance: Interdiscipli-
nary Insights.*:19-32. Abingdon: Routledge.
20. Cruz, C.J.G., Rolim, P.S., Pires, D.S.,
Mendes, C.M.O., Paula, G.M., Porto, L.G.G.,
et al. (2017). Reliability of heart rate variability
threshold and parasympathetic reactivation after
a submaximal exercise test Motriz. *Rio Claro.*
23(1):65-70.
21. Cunha, F.A., Midgley, A.W., Goncalves,
T., Soares, P.P., (2015). Farinatti P. Parasympa-
thetic reactivation after maximal CPET depends
on exercise modality and resting vagal activity
in healthy men. *SpringerPlus.* 4:100. 10.1186/
s40064-015-0882-1.
22. Da Silva, V.P., de Oliveira, N.A., Sil-
veira, H., Mello, R.G.T., Deslandes, C.D.
(2015). Heart Rate Variability Indexes as a
Marker of Chronic Adaptation in Athletes: A
Systematic Review • *Ann Noninvasive Electro-
cardiol.* 20(2):108-18. doi: 10.1111/anec.12237.
23. Damien Saboul, Vincent Pialoux &
Christophe Hautier. (2014). The breathing effect
of the LF/HF ratio in the heart rate variability
measurements of athletes, *European Journal of*

Sport Science. 14(1):282-288. DOI: 10.1080/17461391.2012.691116.

24. De Geus, E.J.C., Gianaros, P.J., Brindle, R.C., Jennings, J.R., Berntson, G.G. (2019). Should heart rate variability be “corrected” for heart rate? Biological, quantitative, and interpretive considerations. *Psychophysiology*. *Psychophysiology*. 56(2): e13287. doi: 10.1111/psyp.13287.

25. De Oliveira Ottone, V., de Castro Magalhães, F., de Paula, F., Avelar, N.C., Aguiar, P.F., da Matta Sampaio, P.F., et.al. (2014). The effect of different water immersion temperatures on post-exercise parasympathetic reactivation. *PLoS One*. 9:e113730. doi: 10.1371/journal.pone.011373.

26. De Paula, T., Neves, M.F., da Silva Itaborahy, A., Monteiro, W., Farinatti, P., Cunha F.A. (2019). Acute Effect of Aerobic and Strength Exercise on Heart Rate Variability and Baroreflex Sensitivity in Men With Autonomic Dysfunction. *J Strength Cond Res*. 33(10):2743-2752. doi: 10.1519/JSC.0000000000002372.

27. Dong, J.G. The role of heart rate variability in sports physiology (Review)

28. Egan-Shuttler, J.D., Edmonds, R., Ives, S.J. (2018). The Efficacy of Heart Rate Variability in Tracking Travel and Training Stress in Youth Female Rowers: A Preliminary Study. [published online ahead of print, 2018 Feb 15]. *J Strength Cond Res*. 15. doi: 10.1519/JSC.0000000000002499

29. Esco, M.R., Flatt, A.A. (2014). Ultra-short-term heart rate variability indexes at rest and post-exercise in athletes: evaluating the agreement with accepted recommendations. *J Sports Sci Med*. 13:535–41.

30. Fatisson, J., Oswald, V., Lalonde, F. (2016). Influence diagram of physiological and environmental factors affecting heart rate variability: an extended literature overview. *Heart Int*. 11:32 – 40. doi: 10.5301 / heartint.5000232.

31. Fazackerley, L.A., Fell, J.W., Kitic, C.M. (2019). The effect of an ultra-endurance running race on heart rate variability. *Eur J Appl Physiol*. 119(9):2001-2009. doi: 10.1007/s00421-019-04187-6.

32. Feketa, V.P., Hleba, L.A., Palamarchuk, O.S., Savka, Yu.M., Kivezhdi, K.B. (2016). Variabelnist sertsevoho rytmu u zdorovykh osib

za umov diafrahmalnoho dykhannia V rezhymi biolohichnoho zvorotnoho zviazku. *Fiziol. zhurn*. 62(4): 66-75.

33. Figueiredo, D.H., Figueiredo, D.H., Moreira, A., Gonçalves, H.R., Stanganelli, L.C.R. (2019). Effect of Overload and Tapering on Individual Heart Rate Variability, Stress Tolerance, and Intermittent Running Performance in Soccer Players During a Preseason. *Strength Cond Res*. 33(5):1222-1231. doi: 10.1519/JSC.00000000000003127

34. Flatt, A.A., Esco, M.R., Nakamura, F.Y. (2018). Association between Subjective Indicators of Recovery Status and Heart Rate Variability among Division-1 Sprint-Swimmers. *Sports (Basel)*. 11;6(3). pii: E93. doi: 10.3390/sports6030093.

35. Flatt, A.A., Globensky, L., Bass, E., Sapp, B.L., Riemann, B.L. (2019). Heart Rate Variability, Neuromuscular and Perceptual Recovery Following Resistance Training. *Sports (Basel)*. 18;7(10). pii: E225. doi: 10.3390/sports7100225.

36. Flatt A.A., Howells D. (2019). Effects of varying training load on heart rate variability and running performance among an Olympic rugby sevens team. *J Sci Med Sport*. 22(2):222-226. doi: 10.1016/j.jsams.2018.07.014.

37. Flatt, A.A., Wilkerson, G.B., Allen, J.R., Keith, C.M., Esco, M.R. (2019). Daily Heart Rate Variability before and after Concussion in an American College Football Player. *Sports (Basel)*. 27;7(5). pii: E97. doi: 10.3390/sports7050097.

38. Fuentes-García, J.P., Villafaina, S., Colado-Mateo, D., de la Vega, R., Olivares, P.R., Clemente-Suárez V.J. (2019). Differences Between High vs. Low Performance Chess Players in Heart Rate Variability During Chess Problems. *Front Psychol*. 26;10:409. doi: 10.3389/fpsyg.2019.00409.

39. Gernot, Ernst. Hidden Signals—The History and Methods of Heart Rate Variability *Front Public Health*. 5:265. doi: 10.3389/fpubh.2017.00265.

40. González-Badillo, J.J., Rodríguez-Rosell, D., Sánchez-Medina, L., Ribas, J., López-López, C., Mora-Custodio, R., et al. (2016). Short-term Recovery Following Resistance Exercise Leading or not to Failure.

Int J Sports Med. 37(4):295-304. doi: 10.1055/s-0035-1564254.

41. Harriss, A.B., Abbott, K., Kimpinski, K., Holmes, J.D., Johnson, A.M., Walton, D.M. et al. (2019). An Evaluation of Heart Rate Variability in Female Youth Soccer Players Following Soccer Heading: A Pilot Study. *Sports (Basel)*. 4;7(11). pii: E229. doi: 10.3390/sports7110229.

42. He, Z. (2020). The control mechanisms of heart rate dynamics in a new heart rate nonlinear time series model. *Sci Rep*. 10: 4814.

43. Hernando, D., Roca, S., Sancho, J., Alesanco, A., Bailón, R. (2018). Validation of the Apple Watch for Heart Rate Variability Measurements During Relax and Mental Stress in Healthy Subjects. *Sensors (Basel)*. 10;18(8):2619. doi: 10.3390/s18082619.

44. Holmes, C.J., Wind, S.A., Esco, M.R. (2018). Heart Rate Variability Responses to an Undulating Resistance Training Program in Free-Living Conditions: A Case Study in a Collegiate Athlete. *Sports (Basel)*. 20;6(4). pii: E121. doi: 10.3390/sports6040121.

45. Hon, E.H., Lee, S.T. (1965). Electronic evaluation of the foetal heart rate r patterns preceding foetal death. *Am J Obstet Gynecol*. 87:814–26.

46. Hottenrott, L., Ketelhut, S., Hottenrott, K. (2019). Commentary: Vagal Tank Theory: The Three Rs of Cardiac Vagal Control Functioning – Resting, Reactivity, and Recovery. *Front Neurosci*. 5;13:1300. doi: 10.3389/fnins.2019.01300.

47. Hottenrott, K., Hoos, O. (2017). Heart Rate Variability Analysis in Exercise Physiology. Jelinek, H.F., Cornforth, D.J. and Khandoker, A.H. (Eds.). *ECG Time Series Variability Analysis: Engineering and Medicine*. 0245-273.

48. Huang, M., Frantz, J., Moralez, G., Sabo, T., Davis, P.F., Davis, S.L., Bell, K.R., Purkayastha, S. (2019). Reduced Resting and Increased Elevation of Heart Rate Variability With Cognitive Task Performance in Concussed Athletes. *J Head Trauma Rehabil*. 34(1):45-51. doi: 10.1097/HTR.0000000000000409.

49. Huzii, O.V. (2018). Zminy reaktyvnosti pokaznykiv sertsevoho rytmu na kerovane dykhannia pry trenuvanni zahalnoi vytryvalosti. *Zaporizkyi medychnyi zhurnal*. 20,1(106):36–40. DOI:10.14739/2310-1210.

50. Javaloyes, A., Sarabia, J.M., Lamberts, R.P., Moya-Ramon, M. (2018). Training Prescription Guided by Heart Rate Variability in Cycling. *Int J Sports Physiol Perform*. 29:1-28. doi: 10.1123/ijsp.2018-0122.

51. Kaikkonen, P., Hynynen, E., Mann, T., Rusko, H., Nummela, A. (2010). Can HRV be used to evaluate training load in constant load exercises? *Eur. J. Appl. Physiol*. 108: 435–442. doi: 10.1007/s00421-009-1240-1

52. Kaikkonen, P., Hynynen, E., Mann, T., Rusko, H., Nummela, A. (2012). Heart rate variability is related to training load variables in interval running exercises. *Eur J Appl Physiol*. 112:829–838. doi: 10.1007/s00421-011-2031-z.

53. 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 Med News*. (264):97-103.

54. Kamandulis, S., Juodsnukis, A., Stanislavaitiene, J., Zuoziene, I.J., Bogdelis, A., Mickevicius, M., et al. (2020). Daily Resting Heart Rate Variability in Adolescent Swimmers during 11 Weeks of Training. *Int J Environ Res Public Health*. 22;17(6). pii: E2097. doi: 10.3390/ijerph17062097.

55. Kiss, O., Sydó, N., Vargha, P., Vágó, H., Czibalmos, C., Édes, E., et al. (2016) Detailed heart rate variability analysis in athletes. *Clinical Autonomic Research*, 26 (4), 245-252. <https://doi.org/10.1007/s10286-016-0360-z>

56. Kiviniemi, A.M., Hautala, A.J., Kinnunen, H., Nissilä, J., Virtanen, P., Karjalainen, J., et al. (2010). Daily exercise prescription on the basis of HR variability among men and women. *Med Sci Sports Exerc*. 42:1355–1363. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181cd5f39.

57. Koenig, J., Thayer, J.F. (2016). Sex Differences in Healthy Human Heart Rate Variability: A Meta-Analysis. *Neurosci Biobehav Rev*. 64:288-310. doi: 10.1016/j.neubiorev.2016.03.007.

58. Kolchyna, O. (2011). Variabelnist sertsevoho rytmu u osib molodoho viku pry vazhkykh fizychnykh navantazhenniakh. *Ukrainskyi medychnyi almanakh*. 14(3): 82-8.

59. Korobeinikova, L.H., Korobeinikov, H.V., Radchenko, Yu.A., Danko, T.H. (2016). Diahnostyka psikhofiziolohichnoho stanu orhanizmu yak odna z kliuchovykh problem sportyvnoi medytsyny. *Sportyvna medytsyna*. 1:3-10.
60. Kovalenko, S.O, Kudii, L.I. (2016). Variabelnist sertsevoho rytmu. *Metodychni aspekty*. Cherkasy: Cherkaskyyi natsionalnyi universytet im. B. Khmelnytskoho. 298 s.
61. Laborde S., Mosley E. and Mertgen, A. (2018). Vagal Tank Theory: The Three Rs of Cardiac Vagal Control Functioning – Resting, Reactivity, and Recovery. *Front. Neurosci.* 12:458. doi: 10.3389/fnins.2018.00458.
62. Le Meur, Y., Pichon, A., Schaal, K., Schmitt, L., Louis, J., Gueneron, J., et al. (2013). Evidence of parasympathetic hyperactivity in functionally overreached athletes. *Medicine and science in sports and exercise*. 45(11):2061–71. 10.1249/MSS.0b013e3182980125.
63. Lehrer, P.M., Gevirtz, R. (2014). Heart rate variability biofeedback: how and why does it work? *Front Psychol*. 5:756.. doi:10.3389/fpsyg.2014.00756.
64. Leicht, A.S., Halliday, A., Sinclair, W.H., D'Auria, S., Buchheit, M., Kenny, G.P., Stanley, J. (2018). Heart rate variability responses to acute and repeated postexercise sauna in trained cyclists. *Appl Physiol Nutr Metab*. 43(7):704-710. doi: 10.1139/apnm-2017-0581.
65. Lima-Borges, D.S., Martinez, P.F., Vanderlei, L.C.M., Barbosa, F.S.S., Oliveira-Junior, S.A. (2018). Autonomic modulations of heart rate variability are associated with sports injury incidence in sprint swimmers. *Phys Sportsmed*. 46(3):374-384. doi: 10.1080/00913847.2018.1450606.
66. MacKinnon, S., Gevirtz, R., McCraty, R., Brown, M. (2013). Utilizing heartbeat evoked potentials to identify cardiac regulation of vagal afferents during emotion and resonant breathing. *Appl Psychophysiol Biofeedback*. 38(4):241–55.
67. McLaren, S.J., Macpherson, T.W., Coutts A.J. (2018). The Relationships Between Internal and External Measures of Training Load and Intensity in Team Sports: A Meta-Analysis. *Sports Med*. 48, 641–658. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0830-z>.
68. Michael, S., Jay, O., Halaki, M., Graham, K., Davis, G.M. (2016). Submaximal exercise intensity modulates acute post-exercise heart rate variability. *Eur. J. Appl. Physiol*. 116:697–706. 10.1007/s00421-016-3327-9.
69. Monfredi, O., Lyashkov, A., Johnsen, A., Inada, S., Schneider, H., Wang, R., et.al. (2014). Biophysical characterization of the underappreciated and important relationship between heart rate variability and heart rate. *Hypertension*. (6): 1334–43. 10.1161/HYPERTENSIONAHA.114.03782
70. Morgan, S.J., Mora J.A.M. (2017). Effect of Heart Rate Variability Biofeedback on Sport Performance, a Systematic Review. *Appl Psychophysiol Biofeedback*. 42(3):235-245. doi: 10.1007/s10484-017-9364-2.
71. Nakamura, F.Y., Flatt, A.A., Pereira, L.A., Ramirez-Campillo, R., Loturco, I., Esco, M.R. (2015). Ultra-Short-Term Heart Rate Variability is Sensitive to Training Effects in Team Sports Players. *J Sports Sci Med*. 14:602–605.
72. Nascimento, E.M.F., Antunes, D., do Nascimento Salvador, P.C., Borszcz, F.K., de Lucas, R.D. (2019). Applicability of Dmax Method on Heart Rate Variability to Estimate the Lactate Thresholds in Male Runners. *J Sports Med (Hindawi Publ Corp)*. 19:207-371. doi: 10.1155/2019/2075371.
73. Paniccia, M., Verweel, L., Thomas, S., Taha, T., Keightley, M., Wilson, K.E. and Reed, N. (2018). Heart Rate Variability in Healthy Non-Concussed Youth Athletes: Exploring the Effect of Age, Sex, and Concussion-Like Symptoms. *Front. Neurol*. 8:753. doi: 10.3389/fneur.2017.00753.
74. Plews, D.J., Laursen, P.B., Buchheit, M. (2016). Day-to-day Heart Rate Variability (HRV) Recordings in World Champion Rowers: Appreciating Unique Athlete Characteristics *International Journal of Sports Physiology and Performance*. 12(5):1-19. DOI: 10.1123/ijspp.2016-0343.
75. Plews, D.J., Laursen, P.B., Le Meur, Y., Hausswirth, C., Kilding, A.E., Buchheit, M. (2014). Monitoring training with heart rate-variability: How much compliance is needed for

valid assessment? *Int J Sports Physiol Perform.* 9:783–790. doi: 10.1123/IJSP.2013-0455.

76. 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 Med.* 43:773–781. doi: 10.1007/s40279-013-0071-8.

77. Podrihalo, L.V., Volodchenko, O.A., Sokol, K.M., Rovna, O.O. (2017). Doslidzhenia variabelnosti sertsevoho rytmu atletiv kiboksynhu. *Visnyk Chernihivskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu. Seriiia : Pedahohichni nauky. Fizychnye vykhovannia ta sport.*147(2):240-244.

78. Pseunok, A.A., Muhotlev, A.M. (2011). Vlyianye sportyvnykh fizycheskykh nahruzok na rehuliatorno-adaptyvnye vozmozhnosti uunyykh dziudoystov 10–12 let. Varyabelnost serdechnoho rytmu: Teoreticheskiye aspekty y praktycheskoe pryomenenye. *Mat. V Vseross. sympozyuma. Izhevsk,* 322–330.

79. Quintana, D.S., Heathers, J.A., Kemp, A.H. (2012). On the validity of using the Polar RS800 heart rate monitor for heart rate variability research. *Eur J Appl Physiol.* 112:4179–4180. doi: 10.1007/s00421-012-2453-2.

80. Rabbani, A., Baseri, M.K., Reisi, J., Clemente, F.M., Kargarfard, M. (2018). Monitoring collegiate soccer players during a congested match schedule: Heart rate variability versus subjective wellness measures. *Physiol Behav.* 1;194:527-531. doi: 10.1016/j.physbeh.2018.07.001.

81. Rabbani, A., Clemente, F.M., Kargarfard, M. Chamari, K. (2019). Match Fatigue Time-Course Assessment Over Four Days: Usefulness of the Hooper Index and Heart Rate Variability in Professional Soccer Players. *Front Physiol.* 19;10:109. doi: 10.3389/fphys.2019.00109.

82. Ramos-Campo, D.J., Rubio-Arias, J.A., Ávila-Gandía, V., Marín-Pagán C., Luque, A., Alcaraz, P.E. (2017). Heart rate variability to assess ventilatory thresholds in professional basketball players. *Sport Health Sci.* 6(4):468-473. doi: 10.1016/j.jshs.2016.01.002.

83. Saboul, D., Pialoux, V., Hautier, C. (2013). The impact of breathing on HRV measurements: Implications for the longitudinal fol-

low-up of athletes. *European Journal of Sport Science* 3(5): 534-542 <https://doi.org/10.1080/17461391.2013.767947>.

84. Schmitt L., Regnard J., Parmentier A.L., Mauny F., Mourot L., Coulmy N., et al. (2015). Typology of ‘Fatigue’ by Heart Rate Variability Analysis in Elite Nordic-skiers. *Int J Sports Med.* 36:999–1007. doi: 10.1055/s-0035-1548885.

85. Schmitt, L., Regnard, J., Millet, G.P. (2015). Monitoring Fatigue Status with HRV Measures in Elite Athletes: An Avenue Beyond RMSSD? *Front Physiol.* 19;6:343. doi: 10.3389/fphys.2015.00343.

86. Schneider, C., Hanakam, F., Wiewelhove, T., Döweling, A., Kellmann, M., Meyer, T., et al. (2018). Heart Rate Monitoring in Team Sports-A Conceptual Framework for Contextualizing Heart Rate Measures for Training and Recovery Prescription. *Front Physiol.* 31;9:639. doi: 10.3389/fphys.2018.00639.

87. Schneider, C., Wiewelhove, T., Raeder, C., Flatt, A.A., Hoos, O., Hottenrott, L., et al. (2019). Heart Rate Variability Monitoring During Strength and High-Intensity Interval Training Overload Microcycles. *Front Physiol.* 22;10:582. doi: 10.3389/fphys.2019.00582.

88. Scott, Michael, Kenneth, S., Graham and Glen, M., Davis, O.A.M., (2017). Cardiac Autonomic Responses during Exercise and Post-exercise Recovery Using Heart Rate Variability and Systolic Time Intervals—A Review. *Front. Physiol.* 8:301. doi: 10.3389/fphys.2017.00301.

89. Shane, Malone, Brian, Hughes, Mark, Roe, Kieran, Collins & Martin, Buchheit. (2017). Monitoring player fitness, fatigue status and running performance during an in-season training camp in elite Gaelic football. *Science and Medicine in Football*, 1(3):229-236. DOI: 10.1080/24733938.2017.1361040.

90. Shevchuk, T.I., Romaniuk, A.P., (2016). Osoblyvosti vehetatyvnoi rehuliatcii sertsia v sportsmeniv ihrovykh vydiv sportu ta lehkoatletiv. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V.N. Karazina. Seriiia biolohiia.* 26:187-195.

91. Slušnienė, A., Laucevičius, A., Navickas, P., Rylškytė, L., Stankus, V., Stankus, A., et al.

- (2019). Daily Heart Rate Variability Indices in Subjects with and Without Metabolic Syndrome Before and After the Elimination of the Influence of Day-Time Physical Activity. *Medicina (Kaunas)*. 17;55(10). pii: E700. doi: 10.3390/medicina55100700.
92. Smith, A.L., Owen, H., and Reynolds, K.J. (2013). Heart rate variability indices for very short-term (30 beat) analysis. Part 1: survey and toolbox. *J. Clin. Monit. Comput.* 27:569–576. doi: 10.1007/s10877-013-9471-4.
93. Soares-Caldeira, L.F., de Souza, E.A., de Freitas, V.H., de Moraes, S.M., Leicht, A.S., Nakamura, F.Y. (2014). Effects of additional repeated sprint training during preseason on performance, heart rate variability, and stress symptoms in futsal players: A randomized controlled trial. *J Strength Cond Res.* 28:2815–2826. doi: 10.1519/JSC.0000000000000461.
94. Stanley, J., Peake, J.M., Buchheit, M. (2013). Cardiac Parasympathetic Reactivation Following Exercise: Implications for Training Prescription. *Sports Med.* 43(12):1259-77. doi: 10.1007/s40279-013-0083-4.
95. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart Rate Variability. Standards of Measurements, Physiological Interpretation, and Clinical Use. *Circulation.* 1996; 93:1043-1065.
96. Thamm, A., Freitag, N., Figueiredo, P., Doma, K., Rottensteiner, C., Bloch, W., Schumann, M. (2019). Can Heart Rate Variability Determine Recovery Following Distinct Strength Loadings? A Randomized Cross-Over Trial. *Int J Environ Res Public Health.* 7;16(22). pii: E4353. doi: 10.3390/ijerph16224353.
97. Tian, Y., He, ZH., Zhao, J.X., Tao, D.L., Xu, K.Y., Earnest, C.P., McNaughton, L.R. (2013). Heart rate variability threshold values for early-warning nonfunctional overreaching in elite female wrestlers. *J Strength Cond Res.* 27:1511–1519. doi: 10.1519/JSC.0b013e-31826caef.
98. Vacher, P., Filaire, E., Mourot, L., Nicolas, M. (2019). Stress and recovery in sports: Effects on heart rate variability, cortisol, and subjective experience. *Int J Psychophysiol.* 143:25-35. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2019.06.011.
99. Vanderlei, L.C.M., Pastre, C.M., Hoshi, R.A., de Carvalho, T.D., de Godoy, M.F. (2009). Basic notions of heart rate variability and its clinical applicability *Rev Bras Cir Cardiovasc.* 24(2): 205-217. <https://doi.org/10.1590/S0102-76382009000200018>.
100. Vesterinen, V., Häkkinen, K., Hynynen, E., Mikkola, J., Hokka, L., Nummela, A. (2013). Heart rate variability in prediction of individual adaptation to endurance training in recreational endurance runners. *Scand J Med Sci Sports.* 23:171–180. doi: 10.1111/j.1600-0838.2011.01365.x.
101. Vesterinen, V., Nummela, A., Heikura, I., Laine, T., Hynynen, E., Botella, J., Häkkinen, K. (2016). Individual Endurance Training Prescription with Heart Rate Variability. *Med Sci Sports Exerc.* 48(7):1347-54. doi: 10.1249/MSS.0000000000000910.
102. Vovkanych, L., Vynohradskyi, B., Vlasov, A., Berezhanskyi, V., Pavlova, Yu., Behan, Yu. (2010). Vykorystannia pokaznykiv variabelnosti sertsevoho rytmu dlia kharakterystyky funktsionalnoi pidhotovlenosti sportsmeniv – biatlonistiv. *Moloda sportyvna nauka Ukrainy: zb. nauk. pr. z haluzi fiz. kultury ta sportu.* Lviv, 14(3):50 – 55.
103. Wang, X., Yan, C., Shi, B., Liu, C., Karmakar, C., Li P. (2018). Does the Temporal Asymmetry of Short-Term Heart Rate Variability Change during Regular Walking? A Pilot Study of Healthy Young Subjects. *Comput Math Methods Med.* 30;2018:3543048. doi: 10.1155/2018/3543048.
104. Weippert, M., Behrens, M., Gonschorek, R., Bruhn, S., Behrens, K. (2015). Muscular contraction mode differently affects autonomic control during heart rate matched exercise. *Front. Physiol.* 6:156. doi: 10.3389/fphys.2015.00156.
105. Williams, S., Booton, T., Watson, M., Daniel Rowland, D., Marco Altini, M. (2017). Heart Rate Variability is a Moderating Factor in the Workload-Injury Relationship of Competitive CrossFit™ Athletes. *J Sports Sci Med.* 16(4): 443–449.