Laboratorinė medicina.
2022, t. 24, Nr. 1(91), p. 40–44.

Širdies susitraukimo dažnio matavimo įrangos palyginamoji analizė, jos taikymas įvairioms fizinėms treniruotėms

Margarita Kiseliūtė[1]
Jūratė Zupkauskienė[2]

Santrauka

Fizinio krūvio širdies susitraukimų dažnis (ŠSD) ir jo stebėsena leidžia palaikyti optimalų treniruotės intensyvumą ir taip pasiekti maksimalią fizinio aktyvumo naudą sveikatai. Treniruotės metu viršijant rekomenduojamą individualų fizinio krūvio intensyvumą galima sukelti tiek trumpalaikę, tiek ilgalaikę žalą sveikatai, todėl itin svarbu tiksliai registruoti ŠSD realiu laiku. Tam gali būti naudingi labai paplitę nešiojamieji prietaisai – ŠSD registratoriai.

Tyrimo tikslas – apžvelgti naujausius mokslinius tyrimus, vertinančius įvairaus pobūdžio ŠSD registratorių tikslumą ir patikimumą, su vartotoju susijusius aspektus bei prietaisų taikymą įvairaus pobūdžio fizinėms treniruotėms.

Tyrimo medžiaga ir metodai. Atlikta 29 mokslinių publikacijų apžvalga. Straipsniai buvo atrinkti iš „PubMed“ ir „Cochrane Library“ duomenų bazių, naudojant šiuos angliškus paieškos žodžius: *heart rate monitors*, *wearable devices*, *training*, *exercise*, *accuracy*. Į apžvalgą įtrauktos paskutinių penkerių metų publikacijos anglų kalba.

Rezultatai. Remiantis apžvelgtų mokslinių publikacijų duomenimis nustatyta, kad skirtingų nešiojamųjų ŠSD monitorių tikslumas skiriasi ir priklauso nuo įvairių veiksnių. Elektrodo veikimu pagrįsti ŠSD monitoriai tiksliausi, o jų tikslumas labiausiai priklauso nuo fizinio krūvio intensyvumo. Optinių ŠSD registratorių tikslumui įtakos turi daugiau veiksnių – treniruotės pobūdis ir intensyvumas, prietaiso tvirtinimo ant kūno vieta ir individualios, su vartotoju susijusios ypatybės, pavyzdžiui kūno odos spalva arba kūno masės indeksas.

Išvados. Iš rinkoje esamų nešiojamųjų prietaisų didžiausiu tikslumu pasižymi ant krūtinės ląstos tvirtinami, elektrodo veikimu pagrįsti ŠSD registratoriai. Optinių ŠSD registratorių tikslumas labai priklauso nuo fizinės veiklos pobūdžio ir fizinio krūvio intensyvumo. Su vartotoju susiję ypatumai taip pat gali skirtingai paveikti įvairių ŠSD registratorių tikslumą.

Reikšminiai žodžiai: širdies susitraukimų dažnio monitoriai, nešiojamieji prietaisai, fizinis aktyvumas, fizinės treniruotės.

[1] *Vilniaus universiteto Medicinos fakultetas*
Vilnius University, Faculty of Medicine
El. paštas: margarita.kiseliute@gmail.com

[2] *Vilniaus universiteto Medicinos fakulteto Širdies ir kraujagyslių ligų klinika*
Vilnius University, Faculty of Medicine, Clinic of Cardiac and Vascular Diseases

ĮVADAS

Širdies susitraukimų dažnis (ŠSD) yra vienas iš pagrindinių rodiklių, turinčių svarbią prognozinę reikšmę asmens sveikatai. Nenormalus ramybės ŠSD leidžia įtarti įvairias lėtines ligas ir prognozuoti padidėjusią kardiovas-

kulinių įvykių tikimybę ateityje [1]. Ne mažiau svarbus sveikatai yra fizinio krūvio ŠSD ir jo stebėsena, leidžianti palaikyti optimalų treniruotės intensyvumą ir taip pasiekti maksimalią fizinio aktyvumo naudą sveikatai [2]. Treniruotės metu viršijant rekomenduojamą individualų fizinio krūvio intensyvumą galima sukelti tiek trumpalaikę, tiek ilgalaikę žalą sveikatai, todėl itin svarbu tiksliai matuoti ŠSD realiu laiku. Tam gali būti naudingi visuomenėje labai paplitę nešiojamieji prietaisai – ŠSD registratoriai. Jau 1980 metų pabaigoje buvo pradėti naudoti ant krūtinės ląstos tvirtinami ŠSD registratoriai, siekiant tiksliai palaikyti treniruočių fizinio krūvio intensyvumą [3], o 2019 metų pradžioje įvairius ŠSD registratorius kasdien naudojo apie 350,4 milijono žmonių visame pasaulyje [4]. Šių prietaisų įvairovė yra didelė. Pagal tvirtinimo ant kūno vietą ŠSD registratorius galima skirti į tris pagrindines grupes: tvirtinamus ant krūtinės ląstos, galūnių ir galvos [5]. Pagal įrenginių veikimo principą ŠSD dažniausiai yra registruojamas naudojant elektrokardiografiją (EKG) arba fotopletizmografiją (FPG) [2]. Tarpusavyje nešiojamieji prietaisai skiriasi savo tikslumu net kai registruoja ŠSD ramybėje [6]. Dar labiau šie skirtumai išryškėja ŠSD registratorius naudojant tam tikroms fizinėms treniruotėms. Siekiant optimalių rezultatų sveikatai atliekant įvairias individualias treniruotes, itin svarbu pasirinkti tinkamiausią ŠSD registratorių.

TYRIMO TIKSLAS

Apžvelgti naujausius mokslinius tyrimus, vertinančius įvairaus pobūdžio ŠSD registratorių tikslumą ir patikimumą, su vartotoju susijusius aspektus ir prietaisų taikymą įvairaus pobūdžio fizinėms treniruotėms.

TYRIMO MEDŽIAGA IR METODAI

Atlikta sisteminė mokslinės literatūros apžvalga. Straipsnių buvo ieškoma „PubMed“ ir „Cochrane Library“ duomenų bazėse, naudojant šiuos paieškos žodžius anglų kalba: *heart rate monitors, wearable devices, training, exercise, accuracy*. Buvo atrinkti 78 potencialūs, apžvalgai tinkantys paskutinių 5 metų viso teksto moksliniai straipsniai anglų kalba. Po detalios jų analizės apžvalgai buvo panaudoti 29 moksliniai straipsniai.

TYRIMO REZULTATAI

Ant krūtinės ląstos tvirtinami ŠSD registratoriai

Ant krūtinės ląstos tvirtinamuose ŠSD monitoriuose yra naudojamas elektrodas, fiksuojantis EKG – laidžiaja širdies sistema sklindantį elektrinį impulsą. Tokie ŠSD monitoriai veikia itin tiksliai – įvertinus jų išmatuotas ŠSD vertes ramybėje ir per įvairias treniruotes, buvo nustatyti beveik vienodi rezultatai su EKG gautomis ŠSD vertėmis – atitikties koreliacijos koeficientas $r_c > 0,99$ (angl. *concordance correlation coefficient*) [7], todėl elektrodo veikimu pagrįsti ŠSD registratoriai dažnai yra naudojami kaip standartas vertinant kitų ŠSD matuojančių prietaisų tikslumą [8–11]. Dėl šios ypatybės tokius ŠSD registratorius dažnai renkasi ir profesionalūs sportininkai, kuriems svarbu tiksliai palaikyti treniruotės intensyvumą [12]. Šiuos registratorius ypač populiaru naudoti didelės ištvermės reikalaujančiose sporto šakose – bėgimo ar dviračių sporto treniruotėse [13]. Šie įrenginiai leidžia ne tik registruoti ŠSD ir palaikyti reikiamą treniruotės intensyvumą, bet ir stebėti energijos sunaudojimą, įveiktą atstumą, registruoti geriausius pasiektus treniruočių rezultatus, o fiksuojant judesius išvengti galimų traumų [12, 13]. Įvairių mokslinių tyrimų, vertinančių skirtingo tipo ŠSD monitorius, duomenys rodo, kad ant krūtinės ląstos tvirtinami registratoriai pasižymi didžiausiu ŠSD vertinimo tikslumu ir patikimumu atliekant įvairią fizinę veiklą – bėgant ($r_c = 0,98$), važiuojant dviračiu ($r_c = 0,99$), einant su šiaurietiško ėjimo lazdomis ($r_c = 0,94$), naudojantis elipsiniu treniruokliu ($r_c = 0,99$) ir atliekant įvairius jėgos pratimus (intraklasinis koreliacijos koeficientas R = 0,83) (angl. *intraclass correlation coefficient*) [2, 7, 13–17]. Taip pat buvo pastebėta, kad tam tikri šio tipo monitoriai yra linkę šiek tiek pervertinti ŠSD, kai fizinis aktyvumas yra nedidelis [14, 15]. Pavyzdžiui, ramybės būsenoje nustatyta vidutinė absoliučioji paklaida tarp nešiojamojo registratoriaus ir EKG išmatuoto ŠSD buvo 3,12 k/min, o naudojantis stacionariu dviračiu nedidele 50 W galia – 6,62 k/min [14]. Pastebėta, kad ŠSD registravimo tikslumas išauga aktyvios fizinės veiklos metu, kai pasiekiamas didesnis ŠSD. Įprasto vaikščiojimo metu, kai ŠSD siekė < 100 k/min, vidutinis skirtumas tarp EKG ir ant krūtinės tvirtinamo ŠSD monitoriaus buvo 0,5 k/min, o ŠSD pasiekus > 120 k/min vidutinis skirtumas prilygo nuliui [2]. Nors ant krūtinės ląstos tvirtinami ŠSD registratoriai ir yra itin tikslūs, jie nėra plačiai naudojami, ypač moterų, dėl dėvint patiriamo diskomforto [3, 17]. Šie registratoriai yra tvirtinami dirželiu tiesiai ant kūno odos, ir siekiant kokybiško signalo sklidimo dažnai reikia palaikyti drėgmę tarp kontaktinių paviršių [18]. Prietaiso dirželio sukeliamas spaudimas, trintis ir nuolatinė drėgmė gali sudirginti kūno odą ir riboti šių ŠSD registratorių ilgesnį dėvėjimą [3]. Nepaisant minėtų trūkumų, ant krūtinės ląstos tvirtinami ŠSD registratoriai yra patikima ir itin tiksli priemonė per įvairias fizines treniruotes realiu laiku stebėti ŠSD ir taip efektyviai kontroliuoti fizinio krūvio intensyvumą.

Ant riešo tvirtinami ŠSD registratoriai

Ant riešo tvirtinami ŠSD registratoriai dažniausiai veikia optiniu metodu, kuris remiasi fotopletizmografija – kintančios pulsinės bangos nustatymu naudojant šviesą skleidžiantį diodą ir fotodetektorių [19]. Medicinoje šis metodas pradėtas plačiai naudoti pulsoksimetruose deguonies saturacijai kraujyje matuoti. Pritaikius šią technologiją ŠSD registruoti ant riešo tvirtinamuose įrenginiuose, tokie nešiojamieji prietaisai tapo populiarūs visuomenėje, nes juos itin lengva ir patogu naudoti [20]. Tačiau neigiama tokių prietaisų naudojimo patirtis dažniausiai yra susijusi su nepastoviu ir netiksliu ŠSD matavimu, kuris dažniausiai skiriasi priklausomai nuo gamintojo specifikacijų, atliekamos fizinės veiklos pobūdžio, fizinio krūvio intensyvumo ir kitų veiksnių. Daugumos atliktų mokslinių tyrimų duomenimis, šio tipo prietaisai ŠSD tiksliausiai registruoja esant ramybės būsenos [6, 8, 13, 16, 17]. Tai patvirtina vienas iš tyrimų, kuris analizavo šešių ant riešo tvirtinamų ŠSD registratorių rodmenis važiuojant dviračiu skirtingu intensyvumu. Ramybėje įvairių įrenginių koreliacija su EKG išmatuotu ŠSD buvo R = 0,76–0,99, o vidutinė absoliučioji paklaida (angl. *mean absolute percentage error*, MAPE) siekė 1,21–7,56 %. Važiuojant dviračiu 100 W galia tie patys rodikliai buvo mažiau tikslūs registruojant ŠSD: R = 0,32–0,85, MAPE = 4,84–27,75 % [14]. Lyginant skirtingo pobūdžio treniruotes tarpusavyje nustatyta, kad aktyvūs rankų judesiai lemia daug artefaktų ir mažina ant riešo dėvimų ŠSD monitorių tikslumą [2, 17, 21].

Naudojant elipsinį treniruoklį su rankų svirtimis nė vienas iš tirtų optinių prietaisų nepateikė tikslių ŠSD matavimų [17]. Palyginus ant riešo dėvimo ŠSD monitoriaus tikslumą vaikštant įprastai ir naudojant šiaurietiškas lazdas, būtent vaikščiojimas pastaruoju būdu pasižymėjo beveik dvigubai didesne vidutine absoliučiaja paklaida tarp EKG ir nešiojamojo prietaiso nurodyto ŠSD (atitinkamai 3,68 k/min ir 6,60 k/min, $p < 0,001$) [2]. Tiriant optinių monitorių veikimą atliekant jėgos pratimus, daugumos jų išmatuotas ŠSD skyrėsi ir buvo mažesnis nei registruotas EKG, o važiuojant dviračiu optinių ŠSD registratorių tikslumas labai sumažėjo didinant važiavimo greitį [14]. Bėgimo metu tirtas ŠSD registravimo tikslumas parodė ganėtinai gerus optinių nešiojamųjų prietaisų rezultatus, tačiau intensyviai bėgant skirtingų ŠSD monitorių tikslumas ėmė mažėti – bėgant 12,88 ir 14,48 km/val. greičiu nė vienas iš tirtų ant riešo tvirtinamų ŠSD registratorių neparodė tikslių duomenų, kur r_c būtų 0,70 [13]. Iš aprašytų tyrimų rezultatų galima daryti išvadą, kad ant riešo dėvimų ŠSD registratorių tikslumas priklauso ne tik nuo fizinės veiklos pobūdžio, bet ir nuo fizinio krūvio intensyvumo. Tiriant šių optinių prietaisų tikslumą pastebėta, kad tiksliausiai ŠSD buvo išmatuojamas nedidelio intensyvumo fizinės veiklos metu, o didėjantis treniruotės intensyvumas labai padidino paklaidą, palyginti su EKG rezultatais [22]. Vieno tyrimo duomenimis, optinių ŠSD registratorių tikslumas itin sumažėja plaukiant ir atliekant intervalines treniruotes, kai ŠSD sparčiai kinta [9]. Taigi remiantis pateiktų tyrimų rezultatais galima teigti, kad ant riešo dėvimų optinių ŠSD registratorių tikslumas priklauso nuo atliekamos fizinės veiklos pobūdžio (1 lentelė) ir fizinio krūvio intensyvumo (2 lentelė). Į tai turėtų atsižvelgti asmenys, rinkdamiesi nešiojamąjį prietaisą, kuris tiksliau vertintų ŠSD atliekant fizines treniruotes.

1 lentelė. **Ant riešo tvirtinamų ŠSD registratorių tikslumo palyginimas, atliekant įvairaus pobūdžio fizines treniruotes**
Table 1. **Accuracy comparison of wrist-worn heart rate monitors during different types of physical activity**

Treniruotės rūšis	Ant riešo tvirtinamų ŠSD registratorių tikslumas
Įprastas ėjimas	+++
Šiaurietiškas ėjimas	++
Bėgimas	++++
Važiavimas dviračiu	++
Elipsinis treniruoklis nenaudojant rankų svirčių	+
Elipsinis treniruoklis naudojant rankų svirtis	+
Jėgos pratimai	++

Paaiškinimai: ŠSD – širdies susitraukimų dažnis. Tikslumas remiantis apžvelgtuose straipsniuose nurodytais rezultatais: (++++) – puikus, (+++) – geras, (++) – vidutinis, (+) – mažas.

2 lentelė. **Ant riešo tvirtinamų ŠSD registratorių tikslumo palyginimas, atliekant fizines treniruotes skirtingu intensyvumu**
Table 2. **Accuracy comparison of wrist-worn heart rate monitors during different intensities of physical activity**

Treniruotės intensyvumas	Ant riešo tvirtinamų ŠSD registratorių tikslumas
Nedidelis	+++
Vidutinis	++
Didelis	+

Paaiškinimai: ŠSD – širdies susitraukimų dažnis. Tikslumas remiantis apžvelgtuose straipsniuose nurodytais rezultatais: (+++) – geras, (++) – vidutinis, (+) – mažas.

Kiti ŠSD registratoriai

Be prieš tai aptartų ŠSD registravimo prietaisų rūšių, rinkoje pristatomi ir ŠSD registratoriai, tvirtinami ant kitų kūno vietų, pavyzdžiui galvos. Iš jų populiariausi yra ausinių pavidalo monitoriai, kurie skirti ne tik muzikai klausyti, bet ir asmens ŠSD registruoti. Į ausis dedamuose prietaisuose, kaip ir ant riešo tvirtinamuose ŠSD monitoriuose, dažniausiai yra naudojama FPG metodika. Atlikti du tyrimai, kurie lygino tarpusavyje įvairaus tipo ŠSD monitorių tikslumą ir nustatė itin gerus ŠSD registruojančių ausinukų veikimo rezultatus [11, 14]. Atliekant jėgos treniruotes į ausis dedamas optinis prietaisas parodė ganėtinai tikslius ŠSD matavimus (R = 0,86, MAPE = 6,24 %), o važiuojant dviračiu šio tipo prietaiso registruotas ŠSD reikšmingai nesiskyrė nuo pamatuoto EKG, nepriklausomai nuo fizinio krūvio intensyvumo, todėl tikslumu aplenkė net ant krūtinės tvirtinamą ŠSD registratorių [14]. Taip pat buvo pademonstruotas ŠSD registruojančių ausinukų tikslumas, juos naudojant bėgimo treniruotėse ($r_c = 0,943$), o atliekant didelio intensyvumo intervalinę treniruotę (angl. *high-intensity interval training*) šių prietaisų fiksuoto ŠSD tikslumas sumažėjo, tačiau vis tiek išliko patikimas ($r_c = 0,861$) [11]. Taigi ausinukų tipo ŠSD registratorius fizinio krūvio intensyvumui vertinti galėtų rinktis asmenys, užsiimantys tokiomis fizinėmis veiklomis kaip bėgimas, važiavimas dviračiu ar jėgos treniruotės.

Su vartotoju susiję ŠSD registratorių naudojimo ypatumai

ŠSD registratorių tikslumas priklauso ne tik nuo treniruotės pobūdžio ar fizinio krūvio intensyvumo, bet ir su pačiu vartotoju susijusių veiksnių – kūno odos spalvos, kūno temperatūros arba kūno masės indekso (KMI). Kūno odos spalva yra vienas iš veiksnių, į kurį atsižvelgia dauguma optinių ŠSD registratorių tikslumą vertinančių tyrėjų [7, 8, 23]. Kelių tyrimų duomenimis, skirtingi odos tonai ŠSD registravimo tikslumo neveikia [7, 8], tačiau yra tyrimų, rodančių, kad tamsesnė kūno odos spalva sumažina optinių ŠSD registratorių tikslumą [21, 23]. Kitas svarbus veiksnys, galintis lemti ŠSD registravimo netikslumus, yra kūno temperatūra. Nustatyta, kad paviršinė kūno odos temperatūra < 20 C ar > 38 C lemia suprastėjusį FPG signalo registravimą [24]. Į tai reikėtų atsižvelgti naudojantis ŠSD registratoriais sportuojant lauke, esant žemai ar itin aukštai aplinkos oro temperatūrai. KMI yra kitas svarbus rodiklis, į kurį atsižvelgia tyrėjai, vertinantys ŠSD registratorių tikslumą [7, 13, 23, 25, 26]. Dauguma tyrėjų pastebėjo neigiamą koreliaciją tarp didesnio asmens KMI ir ŠSD registratorių tikslumo [13, 23, 25]. Nustatyta, kad dėl didesnio odos storio nutukusių asmenų stipininės arterijos gylis nuo kūno paviršiaus yra padidėjęs nuo 2,5 mm iki 3,5 mm [27]. Tai gali lemti iki 40 % FPG signalų netekimo [28] ir neigiamai paveikti matuojamo

ŠSD tikslumą. Tačiau buvo ir tokių tyrimų, kuriuose, atsižvelgus į dalyvių KMI tiriant ŠSD registratorių tikslumą, tokių sąsajų nepastebėta [7] ar net atvirkščiai – didesnis KMI buvo susijęs su tikslesniais ŠSD matavimais [26]. Tokiems rezultatams įtakos galėjo turėti tiek geresnis prietaiso daviklio prigludimas prie tiriamųjų kūno odos, tiek nutukimo nulemtas didesnis transepiderminio vandens netekimas (angl. *transepidermal water loss*) [29], kuris galėjo pagerinti FPG signalo perdavimą. Taigi, kol kas nėra vienodų įrodymų, patvirtinančių, kad kuris nors konkretus su vartotoju susijęs veiksnys akivaizdžiai teigiamai arba neigiamai veiktų ŠSD registratorių tikslumą.

IŠVADOS

1. Nešiojamieji ŠSD registratoriai yra svarbi priemonė, leidžianti realiu laiku stebėti ŠSD ir pagal tai palaikyti individualų rekomenduojamą įvairių fizinių treniruočių intensyvumą.
2. Iš rinkoje esamų nešiojamųjų prietaisų didžiausiu tikslumu pasižymi ant krūtinės ląstos tvirtinami ir elektrodo veikimu pagrįsti ŠSD registratoriai.
3. Įvairių optinių ŠSD registratorių tikslumas labai priklauso nuo fizinės veiklos pobūdžio ir fizinio krūvio intensyvumo.
4. Su vartotoju susiję ypatumai, pavyzdžiui kūno odos spalva arba KMI, gali skirtingai paveikti įvairių ŠSD registratorių tikslumą. ◆

Gauta: 2021 12 28
Priimta spaudai: 2022 03 30

Summary

COMPARATIVE ANALYSIS OF HEART RATE MONITORING DEVICES, THEIR USE IN DIFFERENT TYPES OF PHYSICAL ACTIVITY

Margarita Kiseliūtė, Jūratė Zupkauskienė

Background. Heart rate (HR) monitoring during exercise allows to maintain optimal workout intensity and achieve maximum physical activity benefit for one's health. Exceeding individually recommended exercise intensity can have both short and long-term negative impact on health, which is why real-time HR monitoring is exceptionally important. For this purpose wearable HR monitors can come in handy.

Objective. The objective of this article is to review the newest scientific researches, which evaluate accuracy and reliability of different wearable HR monitors, their usability during different types of physical activity, and user related aspects.

Material and methods. We reviewed 29 scientific publications. Articles were selected from PubMed and Cochrane Library databases. In this review we used articles written in English and published in the last 5 years.

Results. Results of reviewed scientific publications showed that accuracy of various wearable HR monitors differs and depends on a range of factors. Electrode based HR monitors are the most accurate and their accuracy mostly depends on the intensity of the physical activity. Whereas accuracy of optical HR monitors is influenced by more various factors – type and intensity of the exercise, body part on which the device is placed and individual features of the user, such as body skin color or body mass index.

Conclusions. The most accurate wearable devices that are presented in the market to this day are electrode based chest strap monitors. Whereas accuracy of optical HR monitors mostly depends on the type and intensity of the physical activity. User related characteristics can also have different effects on the accuracy of various wearable HR monitors.

Keywords: heart rate monitors, wearable devices, training, exercise, accuracy.

LITERATŪRA

1. Jensen MT. Resting heart rate and relation to disease and longevity: past, present and future. Scand J Clin Lab Invest 2019; 79(1–2): 108–16.
2. Baek S, Ha Y, Park HW. Accuracy of wearable devices for measuring heart rate during conventional and nordic walking. PM&R 2020; 13(4): 379–86.
3. Parak J, Uuskoski M, Machek J, Korhonen I. Estimating heart rate, energy expenditure, and physical performance with a wrist photoplethysmographic device during running. JMIR Mhealth Uhealth 2017 25; 5(7): e97.
4. Statista. https://www.statista.com/
5. Koydemir HC, Ozcan A. Wearable and implantable sensors for biomedical applications. Annu Rev Anal Chem (Palo Alto Calif) 2018; 11(1): 127–46.
6. Xie J, Wen D, Liang L, Jia Y, Gao L, Lei J. Evaluating the validity of current mainstream wearable devices in fitness tracking under various physical activities: comparative study. JMIR Mhealth Uhealth 2018; 6(4): e94.
7. Etiwy M, Akhrass Z, Gillinov L, Alashi A, Wang R, Blackburn G, et al. Accuracy of wearable heart rate monitors in cardiac rehabilitation. Cardiovasc Diagn Ther 2019; 9(3): 262–71.
8. Chow HW, Yang CC. Accuracy of optical heart rate sensing technology in wearable fitness trackers for young and older adults: validation and comparison study. JMIR Mhealth Uhealth 2020; 8(4): e14707.
9. Budig M, Keiner M, Stoohs R, Hoffmeister M, Höltke V. Heart rate and distance measurement of two multisport activity trackers and a cellphone app in different sports: a cross-sectional validation and comparison field study. Sensors (Basel) 2021; 22(1): 180.
10. Dooley EE, Golaszewski NM, Bartholomew JB. Estimating accuracy at exercise intensities: a comparative study of self-monitoring heart rate and physical activity wearable devices. JMIR Mhealth Uhealth 2017; 5(3): e34.
11. Bunn J, Wells E, Manor J, Webster M. Evaluation of earbud and wristwatch heart rate monitors during aerobic and resistance training. Int J Exerc Sci 2019; 12(4): 374–84.
12. Li RT, Kling SR, Salata MJ, Cupp SA, Sheehan J, Voos JE. Wearable performance devices in sports medicine. Sports Health 2016; 8(1): 74–8.
13. Pasadyn SR, Soudan M, Gillinov M, Houghtaling P, Phelan D, Gillinov N, et al. Accuracy of commercially available heart rate monitors in athletes: a prospective study. Cardiovasc Diagn Ther 2019; 9(4): 379–85.
14. Boudreaux BD, Hebert EP, Hollander DB, Williams BM, Cormier CL, Naquin MR, et al. Validity of wearable activity monitors during cycling and resistance exercise. Med Sci Sports Exerc 2018; 50(3): 624–33.
15. Morgado Areia C, Santos M, Vollam S, Pimentel M, Young L, Roman C, et al. A chest patch for continuous vital sign monitoring: clinical validation study during movement and controlled hypoxia. J Med Internet Res 2021; 23(9): e27547.
16. Montes J, Navalta JW. Reliability of the Polar T31 uncoded heart rate monitor in free motion and treadmill activities. Int J Exerc Sci 2019; 12(4): 69–76.
17. Gillinov S, Etiwy M, Wang R, Blackburn G, Phelan D, Gillinov AM, et al. Variable accuracy of wearable heart rate monitors during aerobic exercise. Med Sci Sports Exerc 2017; 49(8): 1697–703.
18. Hettiarachchi IT, Hanoun S, Nahavandi D, Nahavandi S. Validation of Polar OH1 optical heart rate sensor for moderate and high intensity physi-

cal activities. PLoS One 2019; 14(5): e0217288.
19. Chen S, Qi J, Fan S, Qiao Z, Yeo JC, Lim CT. Flexible wearable sensors for cardiovascular health monitoring. Adv Healthc Mater 2021; 10(17): e2100116.
20. Mukhopadhyay SC. Wearable electronics sensors for safe and healthy living. Springer, 2015.
21. Hermand E, Cassirame J, Ennequin G, Hue O. Validation of a photoplethysmographic heart rate monitor: Polar OH1. Int J Sports Med 2019; 40(7): 462–7.
22. Thomson EA, Nuss K, Comstock A, Reinwald S, Blake S, Pimentel RE, et al. Heart rate measures from the Apple Watch, Fitbit Charge HR 2, and electrocardiogram across different exercise intensities. J Sports Sci 2019; 37(12): 1411–9.
23. Shcherbina A, Mattsson CM, Waggott D, Salisbury H, Christle JW, Hastie T, et al. Accuracy in wrist-worn, sensor-based measurements of heart rate and energy expenditure in a diverse cohort. J Pers Med 2017; 7(2): 3.
24. Maeda Y, Sekine M, Tamura T. The advantages of wearable green reflected photoplethysmography. J Med Syst 2011; 35(5): 829–34.
25. Menghini L, Gianfranchi E, Cellini N, Patron E, Tagliabue M, Sarlo M. Stressing the accuracy: wrist-worn wearable sensor validation over different conditions. Psychophysiology 2019; 56(11): e13441.
26. Blok S, Piek MA, Tulevski II, Somsen GA, Winter MM. The accuracy of heartbeat detection using photoplethysmography technology in cardiac patients. J Electrocardiol 2021; 67: 148–57.
27. Hirt PA, Castillo DE, Yosipovitch G, Keri JE. Skin changes in the obese patient. J Am Acad Dermatol 2019; 81(5): 1037–57.
28. Boonya-Ananta T, Rodriguez, AJ, Ajmal A, Du Le VN, Hansen AK, Hutcheson JD, et al. Synthetic Photoplethysmography (PPG) of the radial artery through parallelized Monte Carlo and its correlation to Body Mass Index (BMI). Sci Rep 2021; 11: 2570.
29. Monteiro Rodrigues LM, Palma L, Santos O, Almeida MA, Bujan J, Tavares L. Excessive weight favours skin physiology – up to a point: another expression of the obesity paradox. Skin Pharmacol Physiol 2017; 30(2): 94–101.