

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА

КОЖУХІВСЬКА ДАР'Я ВАСИЛІВНА

Допускається до захисту:
завідувач кафедри біофізики і фізіології
кандидат хім. наук, доцент
_____ О. І. Доценко
« _____ » _____ 20_ р.

Відношення між швидкістю відновлювання серцевого ритму після
фізичної вправи та варіабельністю серцевого ритму

Спеціальність 091 Біологія
Кваліфікаційна (магістерська) робота

Науковий керівник:
А. М. Міщенко, старший викладач
кафедри біофізики та фізіології
канд. біол. наук

Оцінка: _____ / _____ /

Голова ЕК: _____

Анотація

Кожухівська Д. В. Відношення між швидкістю відновлювання серцевого ритму після фізичної вправи та варіабельністю серцевого ритму. Спеціальність 091 «Біологія». Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, 2023.

В магістерській роботі досліджено відношення між швидкістю відновлювання серцевого ритму після фізичної вправи та варіабельністю серцевого ритму з метою визначення наявності прямих залежностей між цими показниками.

Ключові слова: варіабельність серцевого ритму, частота серцевих скорочень, відновлювання серцевого ритму, фізичні вправи.

54 с., 10 табл., 22 рис., 45 джерел.

Kozhukhivska D. Heart rate recovery after exercise: the relation between heart rate recovery after exercise and heart rate variability. Specialty 091 «Biology». Vasyl' Stus Donetsk National University, Vinnytsia, 2023.

In the master's thesis the relationship between the speed of recovery of the heart rate after physical exercise and the variability of the heart rate was investigated in order to determine the presence of direct dependencies between these indicators.

Keywords: heart rate variability, heart rate, heart rate recovery, exercise.

54 pp., 10 tabl., 22 fig., 45 sources.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	4
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	9
1.1 Вегетативна регуляція серця під час фізичного навантаження та відновлення	9
1.2 Варіабельність серцевого ритму під час фізичного навантаження	11
1.3 Варіабельність серцевого ритму під час відновлення після фізичного навантаження.....	12
1.4 Систолічні часові інтервали	13
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	17
2.1 Експериментальний протокол	17
2.2 Первинна обробка зареєстрованих сигналів	18
2.3 Показники ВДСР	19
2.4 Показники ВСР.....	23
2.5 Додаткові показники обчислені на основі ЕКГ, ФПГ та респіраторного сигналу.	25
2.6 Статистичний аналіз	27
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	29
3.1 Показники ВСР сидячи та стоячи в спокої.....	29
3.2 Кореляція ЧСС та показників ВСР сидячи та стоячи в спокої.....	31
3.3 Кореляція показників ВСР сидячи та стоячи в спокої та ЧСС після виконання вправи	31
3.4 Кореляція показників ВДСР, незалежних та змішувальних змінних	36
3.5 Кореляція показників ВСР сидячи та стоячи в спокої та ВДСР після виконання вправи	39
ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	49

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

ВДСР (HRR)	відновлення серцевого ритму (heart rate recovery)
ВНС	вегетативна нервова система
ВСР (HRV)	варіабельність серцевого ритму (heart rate variability)
ДІ	довірчий інтервал
СЧІ	систоличні часові інтервали
ЧСС (HR)	частота серцевих скорочень (heart rate)
NNI	часові ряди нормальних RR-інтервалів
РТТ	час проходження пульсової хвилі (pulse transit time)
RR	інтервал між двома сусідніми зубцями R

ВСТУП

Актуальність. Вегетативна нервова система (ВНС) регулює роботу серцево-судинної системи. ВНС контролює частоту серцевих скорочень і відповідні реакції артеріального тиску під час повсякденної діяльності. ВНС також може використовуватися для спостереження за функцією вісцеральних органів, а отже, є корисним індикатором для визначення стану здоров'я людини.

За останнє десятиліття з розвитком технології переносних пристроїв для вимірювання варіабельності серцевого ритму (ВСР) збільшилася кількість досліджень ВСР. Однак, на сьогодні оцінка ВСР все ще недостатньо використовується для оцінки здоров'я серця. ВСР є показником, що описує варіації часових інтервалів між сусідніми інтервалами RR. Інформація, яку надає ВСР, відображає коливання активності парасимпатичних і симпатичних нервів і є показником рівноваги між двома системами.

Загалом, достатній серцевий вегетативний контроль, який супроводжується відносно високою ВСР, є перевагою як для фізіологічного, так і для психологічного здоров'я. Висока ВСР у популяції пов'язана з добрим здоров'ям, низьким рівнем стресу та низьким ризиком раптової смерті та є корисним показником позитивного результату тренування та адаптації для покращення спортивних результатів. На противагу цьому, низька ВСР пов'язана зі зниженням фізичної підготовки, високим рівнем стресу, підвищеним ризиком серцево-судинних захворювань і поганою адаптацією до тренувань у спортсменів.

Результати дослідження ВСР легко інтерпретувати та зчитувати за допомогою мобільних технологій, таких як мобільні телефони чи інші портативні пристрої. Крім того, результати ВСР є миттєвими та не залежать від методів лабораторного аналізу, які можуть зайняти багато часу. Тести ВСР можуть оцінити стан здоров'я людини з точки зору ВНС, а не за

допомогою традиційних кінетичних систем. Крім того, тестування ВСР дає миттєві результати, а зміни в планах фізичних вправ можна виконати ефективно та швидко без консультації лікаря. Крім того, ВСР сприяє своєчасному виявленню кардіологічних ризиків і запобіганню серцево-судинним проблемам і потенційним летальним наслідкам.

Кілька досліджень вивчали взаємозв'язок між ВСР та вегетативною модуляцією за допомогою ВСР, зосереджуючись на оцінці ВСР лише в положенні лежачи або сидячи до та після фізичного навантаження [3438]. Інші дослідження вивчали цей зв'язок, включаючи аналіз ВСР перед виконанням фізичних вправ лише в положенні лежачи та ВДСР у положенні стоячи після тесту на біговій доріжці [3942]. Тому, якщо виключити аналіз ВСР у положенні стоячи, можуть виникнути суперечливі результати або навіть помилкова інтерпретація даних [37, 3942] через розбіжність в оцінці кореляції між ВСР та вегетативною модуляцією у спокої в різних положеннях. Насправді, вегетативний статус має відмінності у положеннях лежачи та стоячи, і тест з фізичним навантаженням виконується в положенні стоячи з вимірюванням ВДСР у цій ситуації [4345]. З огляду на те, що ВДСР є адаптивним динамічним явищем, яке залежить від змін у вегетативній модуляції, важливо оцінити кореляцію між обома функціональними станами, враховуючи різні вегетативні статуси спокою як у положенні лежачи, так і стоячи.

Короткочасна адаптація серцево-судинної системи після фізичного навантаження пов'язана з одночасним швидким підвищенням парасимпатичної та прогресуючим зниженням симпатичної активності. Розумно очікувати, що ці вегетативні зміни залежать від вегетативного стану в стані спокою і що адаптивні зміни частоти серцевих скорочень до стресу, спричиненого фізичним навантаженням, відображають цей стабільний вегетативний стан. Через парасимпатичний внесок як у відновлення ВСР, так і у відновлення частоти серцевих скорочень після фізичних навантажень можна припустити, що показники ВСР (переважно

парасимпатичної активності) до і після фізичного навантаження пов'язані зі швидкістю відновлення ВСР та ЧСС після фізичного навантаження, отже потребують детального подальшого вивчення.

Об'єкт дослідження: швидкість відновлювання та варіабельність серцевого ритму після фізичної вправи.

Предмет дослідження: відношення між швидкістю відновлювання серцевого ритму після фізичної вправи та варіабельністю серцевого ритму.

Мета роботи: дослідити взаємозв'язок між вегетативною модуляцією серцевого ритму в стані спокою, що оцінюється за допомогою ВСР в положенні сидячи та стоячи та ВДСР після фізичної вправи з максимальним навантаженням у здорових людей.

Задачі:

1. Провести збір та обробку експериментальних даних.
2. Провести кореляційний аналіз між показниками ВСР в спокої в положенні сидячи та стоячи та показниками ВДСР після фізичної вправи з максимальним навантаженням.
3. Проаналізувати вплив положення піддослідного в якому оцінювалася ВСР на її кореляцію з ВДСР після фізичної вправи.
4. Проаналізувати вплив на результати кореляційного аналізу способу оцінки показників ВДСР після фізичної вправи.
5. Проаналізувати відмінності результатів кореляційного аналізу для даних групи піддослідних та даних повторних вимірювань одного піддослідного.

Апробація результатів дослідження: Результати магістерської роботи було оприлюднено на VII Міжнародній науковій конференції здобувачів вищої освіти, аспірантів та молодих вчених «Актуальні питання розвитку біології та екології», м. Вінниця, 16–17 листопада 2022 р. Тези: Д. В. Кожухівська, А. М. Міщенко. Згідність короткострокової та ультра короткострокової варіабельності серцевого ритму.

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних посилань із 45 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 54 сторінок.



РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Кількісне визначення коливань інтервалів між зубцями R, що називають варіабельністю серцевого ритму (ВСР), вважається корисним методом моніторингу вегетативної активності, зокрема парасимпатичної модуляції серця. Моніторинг відповідей ВСР на «тест із фізичним навантаженням» може дати корисне розуміння вегетативної реактивності стрес [13]. Це узгоджується з «гіпотезою реактивності», яка припускає, що реакція серцево-судинної системи на стресор може бути прогностичною ознакою певних захворювань, а також є корисною для моніторингу тренувального статусу спортсменів. Наприклад, кінетика ВСР під час субмаксимальних або максимальних вправ може передбачити аеробну підготовленість та ефективність вправ. Подібним чином, відновлення ВСР після фізичних вправ відбувається швидше в осіб з більшою аеробною підготовленістю [16].

1.1 Вегетативна регуляція серця під час фізичного навантаження та відновлення

Під час тренування мають відбутися суттєві зміни у роботі серцево-судинної системи, щоб задовольнити конкуруючі потреби працюючих м'язів (метаболічні потреби) і шкірного кровотоку (терморегуляційні потреби), підтримуючи кров'яний тиск і адекватну перфузію інших органів. Існує модель, яка припускає, що після початку вправи низхідні «прямі» вхідні сигнали від вищих центрів мозку («центральна команда») до медулярного серцево-судинного центру скидають артеріальний барорефлекс до вищої робочої точки, викликаючи швидке збільшення ЧСС, яке в основному опосередковується зниженою серцевою парасимпатичною нервовою активністю, тобто «парасимпатичною зупинкою» [17]. Швидкий зворотний зв'язок від м'язових механорецепторів сприяє початковому парасимпатичному вилученню, тоді як навантаження серцево-легеневих барорецепторів (через збільшення венозного повернення внаслідок дії

м'язового насоса), ймовірно, також викликає відкриття серцевої парасимпатичної нервової активності, а також початкове зниження серцевої симпатичної нейронної активності [18]. І початкове зниження серцевої симпатичної нейронної активності, і серцева парасимпатична нервова активність регулюють ЧСС протягом усього періоду виконання вправ — початкове зниження серцевої симпатичної нейронної активності працює як «регулятор тону», а серцева парасимпатична нервова активність — як «швидка відповідь/модулятор» — при цьому відносний «баланс» змінюється від переважно «парасимпатичного контролю» у стані спокою та низької інтенсивності до переважно «симпатичного контролю» при високій інтенсивності [1]. У міру подальшого збільшення інтенсивності вправ прогресуюче відновлення барорефлексу, а також аферентний зворотний зв'язок від м'язових метаборецепторів викликають подальшу серцеву парасимпатичну зупинку та симпатичну активацію, остання з яких все більше посилюється від помірної до максимальної інтенсивності системною симпато-адреналовою активацією [12].

Після припинення вправ вищезгадані процеси, що опосередковують кардіоприскорення під час вправ, по суті, відбуваються у зворотному порядку. Однак деталі того, які механізми опосередковують конкретні аспекти профілю часу кардіоуповільнення після фізичних навантажень, до певної міри менш точно встановлені, частково через більшу процедурну варіацію (наприклад, активне проти пасивного відновлення та поза після тренування) [11]. Тим не менш, переважна модель стверджує, що різке усунення «центральної команди» разом зі скасуванням зворотного зв'язку від м'язових механорецепторів (для пасивного відновлення) скидає артеріальний барорефлекс на нижчий рівень і викликає початкове зниження ЧСС, яке переважно опосередковується збільшенням серцевої парасимпатичної нервової активності. Отже, цю «швидку фазу» (тобто 1 хвилину) відновлення ЧСС часто приписують «парасимпатичній реактивації», хоча деякі дані свідчать про симпатичну участь [19]. У міру

відновлення спостерігається більш поступова «повільна фаза» кардіо децелерації, ймовірно, опосередкована як прогресуючою парасимпатичною реактивацією, так і симпатичною зупинкою. Вважається, що ці більш повільні вегетативні коригування викликані в основному залежною від інтенсивності комбінацією поступового кліренсу метаболітів (тобто зниження метаборексусу) і зниження циркулюючих катехоламінів, тоді як терморегуляційні фактори (прямі терморекторні аференти та/або перерозподіл кровотоку) також можуть бути залученим [10].

1.2 Варіабельність серцевого ритму під час фізичного навантаження

Під час фізичних вправ показники ВСР демонструють криволінійний спад як функцію інтенсивності вправ, що тісно пов'язана з ЧСС [4]. Показники ВСР, пов'язані з парасимпатичною активністю серця, зазвичай досягають майже нульового мінімуму при помірній інтенсивності (можливо, це пов'язано з першим вентиляційним/лактатним порогом). Іноді спостерігають, що ці показники дещо збільшуються, коли інтенсивність вправ збільшується до максимуму, хоча це, ймовірно, опосередковується такими механізмами як прямий механічний вплив дихання на синоатріальний вузол [20]. Наявні наукові дані також призводять до подальшого сумніву щодо використання співвідношення частотних областей і нормалізованих показників як індикаторів симпатичної активності [9].

Що стосується тривалості фізичного навантаження, обмежена кількість літератури свідчить про те, що тривале фізичне навантаження може впливати (послаблювати) на ВСР під час тренування, хоча це спостерігалось лише в дослідженнях, де є супутнє підвищення ЧСС (тобто серцево-судинний дрейф), а також коли ВСР знижується при не досягнутому мінімуму інтенсивності вправ [21]. Дійсно, підвищення ЧСС (що представляє підвищену внутрішню інтенсивність, незалежно від зовнішнього навантаження) може бути причиною будь-якої зміни ВСР, а не

прямим впливом тривалості вправи. Навпаки, тривала тривалість фізичних вправ може бути пов'язана з прогресуючою парасимпатичною зупинкою (що вказує на зниження ВСР), а це, у свою чергу, може сприяти серцево-судинному дрейфу. Важко зробити висновок, що впливає на ВСР за умов різних значень ЧСС [8].

Фізичні вправи можуть змінювати ВСР, хоча не всі дослідження підтверджують це. Інтерпретація результатів є важкою, оскільки будь-який вплив модальності вправ поєднується з проблемою відповідності в інтенсивності вправ [22]. Цікаво, що дослідження, що вивчають різні динамічні модальності, які, як очікується, викликають різні ортостатичні/циркуляційні умови (наприклад, поза, сила тяжіння або занурення у воду), як правило, не виявили суттєвого впливу на ВСР під час фізичних вправ [23]. Натомість група м'язів, яка використовується, і режим скорочення (наприклад, статичне проти динамічного), здається, є більш вагомими факторами, пов'язаними з модальністю, які впливають на реакцію ВСР під час тренування. Тим не менш, інтенсивність фізичних вправ є найсильнішим визначальним фактором ВСР під час тренувань [2].

1.3 Варіабельність серцевого ритму під час відновлення після фізичного навантаження

Численні дослідження вказують на те, що, як і під час фізичних вправ, інтенсивність фізичних вправ є основним визначальним фактором відновлення ВСР після тренування [6]. Після припинення фізичного навантаження показники ВСР демонструють залежне від часу відновлення, яке зазвичай (хоча не завжди) сповільнюється після більшої попередньої інтенсивності фізичного навантаження. Таким чином, реакція інтенсивності на ВСР під час відновлення не була чітко з'ясована [24]. Нещодавно було показано, що час відновлення частоти серцевих скорочень (HRR) протягом 1-ї або 2-ї хвилини після різкого фізичного навантаження є незалежним предиктором загальної смертності.

Також поки що не зрозуміло, як тривалість тренування впливає на ВСР під час відновлення після тренування. Хоча три дослідження повідомляють, що збільшення тривалості вправ на 100% не змінює ВСР під час негайного відновлення, одне дослідження виявило, що відновлення ВСР уповільнюється після збільшення тривалості вправ на 300–400% (від ~20 до ~90 хв) [25]. Це може свідчити про те, що тривалість вправи має бути подовжена понад деяку критичну тривалість (або відносну, або абсолютну), перш ніж можна буде спостерігати вплив на відновлення ВСР, однак це залишається спірним [30]. Крім того, незрозуміло, як інтенсивність і тривалість вправ можуть взаємодіяти, впливаючи на відновлення ВСР після вправ [7]. Два дослідження, які вивчали вплив модальності фізичних вправ на ВСР після тренування, свідчать про те, що більша активна м'язова маса та/або витрати енергії пов'язані з уповільненим відновленням ВСР, принаймні після максимального поступового навантаження. Очевидно, що необхідні додаткові дослідження для подальшого з'ясування впливу тривалості та модальності вправ на реакцію ВСР після вправ.

Хоча деякі вимірювання ВСР є загальноприйнятими для надання розуміння серцевої парасимпатичної модуляції, вважається, що ВСР не відображає серцевої симпатичної активності. Це є важливим питанням, що потребує подальшого вивчення, оскільки симпатична гіперактивність пов'язана з підвищеним ризиком захворюваності/смертності [29].

1.4 Систолічні часові інтервали

Систолічні часові інтервали (СЧІ) є ще одним класом неінвазивних вимірювань, які можуть надати цінну інформацію про серцеву симпатичну активність на додаток до вже перелічених вимірювань [28].

Вимірювання систолічних часових інтервалів є корисним неінвазивним показником симпатичної активності серця. Як і у випадку з ВСР, показники СЧІ відображають інтегровану відповідь кінцевих органів, у цьому випадку опосередковано оцінюючи інотропні серцеві ефекти, які, як вважається,

знаходяться під сильним симпатичним впливом. Відповідно, необхідно враховувати застереження/обмеження щодо тлумачення несимпатичних впливів (зокрема потенційних ефектів навантаження на серце, тобто попереднього та після навантаження). Незважаючи на ці обмеження, вимірювання періоду перед серцевим викидом надає цінну інформацію про вегетативну регуляцію серця, оскільки період перед серцевим викидом тісно (зворотно) пов'язаний із симпатичною активністю серця [27].

Вплив різних доз фізичних вправ на реакцію періоду перед серцевим викидом під час фізичних навантажень ретельно не досліджувався. Тим не менш, наявні дані вказують на те, що (зворотна) реакція періоду перед серцевим викидом узгоджується з висновком про симпатичну активність під час фізичних вправ і відновлення. Для підтвердження цього необхідні додаткові дослідження, особливо в період відновлення. Невідомо, як тривалість фізичних вправ впливає на реакцію періоду перед серцевим викидом на фізичні вправи та відновлення, а також точно не встановлено, як ці відповіді змінюються різними варіаціями фізичних вправ. Крім того, перевірка надійності цих показників під час і після тренувань вимагає подальших досліджень [3].

Через парасимпатичний внесок як у відновлення ВСР, так і у відновлення частоти серцевих скорочень після фізичних навантажень можна припустити, що показники ВСР (переважно парасимпатичної активності) до і після фізичного навантаження пов'язані зі швидкістю відновлення ВСР та ЧСС після фізичного навантаження [26].

Висновок. Фізичні вправи викликають суттєві зміни показників ВСР, і кілька досліджень досліджували ВСР під час фізичних вправ і відновлення ЧСС та ВСР після них. Дослідження відновлення після фізичних вправ ускладнюється широким спектром використовуваних протоколів виконання фізичних вправ і відновлення. Якщо об'єднати ці фактори, то дуже небагато досліджень, що вивчають ВСР під час фізичних навантажень та/або відновлення, можна прямо порівняти.

У літературі зазначено, що інтенсивність фізичних вправ є основним фактором «دوزи» фізичних вправ, що визначає реакцію ВСР як під час фізичного навантаження, так і під час відновлення після тренування. Більшість показників ВСР демонструють зниження на початку тренування, а також залежне від інтенсивності зниження до майже нульового рівня. Інтенсивність, при якій виникає майже нульовий мінімум, залежить від типу результату ВСР. Нормалізовані показники та вимірювання в частотній області демонструють суперечливу реакцію під час фізичного навантаження, яка не відповідає відомим аспектам серцевої вегетативної діяльності. Після припинення фізичного навантаження ВСР відновлюється як функція часу, причому більш висока інтенсивність фізичного навантаження часто (хоча не завжди) пов'язана із затримкою профілю відновлення. Щодо надійності визначення ВСР під час фізичних навантажень і відновлення, кілька досліджень на сьогоднішній день повідомили про спірні результати.

Є обмежені дані про вплив тривалості або різновиду діяльності на ВСР під час фізичних вправ і відновлення. Методологічно такі дослідження складні через тісний зв'язок між ЧСС і ВСР. Тривале фізичне навантаження асоціюється зі зниженням ВСР під час фізичного навантаження лише тоді, коли супроводжується супутнім підвищенням ЧСС. Було показано, що подовжена тривалість вправ (збільшення на 100%) не спричинила значного впливу на відновлення ВСР після вправ, хоча повідомлялося про затримку відновлення, коли тривалість подовжувалась більш ніж на 300% (наприклад, від ~20 до ~90 хв). Щодо модальностей, деякі дослідження повідомляють, що режим фізичних вправ може змінити реакцію ВСР (навіть якщо ЧСС відповідає), хоча інші дослідження повідомляють про відсутність істотного впливу модальності. Під час відновлення дуже обмежені дослідження показують, що способи використання більшої активної м'язової маси (або викликання більших витрат енергії) пов'язані з уповільненням відновлення ВСР. Потенційна взаємодія інтенсивності-тривалості та інтенсивності-

модальності на ВСР під час фізичних вправ не з'ясована. Потрібні подальші дослідження, перш ніж можна буде зробити висновки щодо впливу тривалості та модальності вправ на ВСР під час вправ і відновлення.

Оскільки вимірювання ВСР не є широко прийнятими для відображення серцевої симпатичної активності, варто відзначити, що ЧСС надають корисну інформацію про роботу серця. Зокрема, період перед серцевим викидом є оберненим показником симпатичної активності серця. Хоча обмежена кількість досліджень вказує на те, що реакція періоду перед серцевим викидом на фізичні навантаження та відновлення загалом узгоджується з існуючими даними симпатичних впливів на серце, наслідки різних «доз» фізичних навантажень не визначені, особливо в період відновлення.

Нарешті, в той час як ВСР та ЧСС відображають різні аспекти серцевої функції (хронотропну та інотропну), показники серцевої симпатичної активності можна використовувати як доповнення до показників ВСР серцевої парасимпатичної активності, щоб отримати більш повне уявлення про вегетативну регуляцію серця.

РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Експериментальний протокол

У дослідженні взяли участь 15 здорових піддослідних (5 жінок та 10 чоловіків) віком 20-50 років, без наявних видимих патологій. На протязі всієї експериментальної сесії у піддослідного реєстрували: ЕКГ, ФПГ, сигнал дихання. Для реєстрації сигналу ЕКГ використовувалось І стандартне відведення. Сигнал ФПГ реєструвався на вказівному пальці правої руки. В обох випадках частота дискретизації була приблизно 500 Гц. Експериментальна сесія складалась з трьох етапів. Тривалість кожного етапу була 7 хвилин. На першому етапі пацієнт нерухомо сидів. Далі самотужки вставав і на другому етапі реєстрація здійснювалась стоячи. На початку третього етапу піддослідний починав присідати, присідання тривали 60 секунд. На 60-й секунді присідання припинялись, решту часу піддослідний нерухомо стояв. Кожен піддослідний отримувал інструкцію присідати з максимально можливою для нього інтенсивністю. Після реєстрації відбирались тільки ті результати в яких навантаження для піддослідних було максимальним, це визначалось за тим чи досягав пульс під час присідань максимального значення для даного піддослідного.

Для реєстрації ЕКГ використовувался чіп AD8232 (Analog Devices) та АЦП ADS1115 (Texas Instruments; 16 bit; 860 SPS; I2C). Для реєстрації сигналу ФПГ використовувался датчик MAX30102 (Maxim Integrated USA; I2C), що працює в режимі відбивання та має ІЧ ($\lambda \approx 880$ нм) та червоний ($\lambda \approx 660$ нм) канали. Кожен з сенсорних модулів підключався до окремого модуля мікроконтролера ESP8266. Для синхронізації часу сигналів, що вимірювались різними модулями ESP8266, використовувался синхронізуючий сигнал, що генерувався заданою періодичністю одним з реєструючих модулів ESP8266.

2.2 Первинна обробка зареєстрованих сигналів

Обробка зареєстрованих сигналів та отриманих з них даних здійснювалась з використанням скриптів написаних мовою Python. При обробці сигналів зареєстрованих на стадіях 1 та 2 експериментальної сесії, використовувались останні 5 хвилин кожного з зареєстрованих сигналів. При обробці сигналів зареєстрованих на стадії 3, використовувалися всі 7 хвилин реєстрації. Процес обробки зареєстрованих сигналів ЕКГ, ФПГ та сигналу дихання полягав в наступному. Для всіх сигналів знаходились особливості. Для сигналу ЕКГ знаходились положення R-піків. Для сигналу ФПГ знаходились систолічний та діастолічний максимуми та серединна точка точки між максимумом та мінімумом. Для сигналу дихання знаходились піки та западини. На основі знайдених особливостей для сигналу ЕКГ отримували часовий ряди нормальних RR-інтервалів (NNI) (рис. 2.1). Часові ряди NNI використовувались для обчислення показників ВСР та ВДСР. Використовуючи положення R-піків та особливості знайдені для ФПГ, обчислювався часовий ряд часу проходження пульсової хвилі (Pulse Transit Time, PTT) від серця до вказівного пальця правої руки (рис. 2.2). Таким чином було отримано три різних варіанти PTT в залежності від того які особливості сигналу ФПГ використовувались: діастолічний мінімум (PTT_{min}), систолічний максимум (PTT_{max}) чи серединна точка (PTT_{mid}). Точність знаходження положень діастолічних мінімумів та серединної точки була кращою за точність знаходження діастолічних максимумів тому в подальшому ми будемо використовувати тільки величини PTT_{min}, PTT_{mid}. Також на основі особливостей сигналу ФПГ отримувався часовий ряд сатурації киснем (Saturation of peripheral Oxygen, SpO₂) (рис. 2.3). Для сигналу дихання отримувалась показники частоти та глибини дихання (рис 2.4).

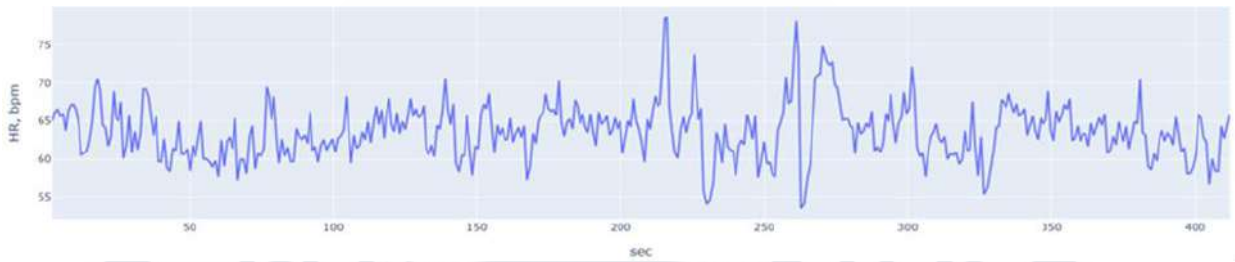


Рисунок 2.1 – Часовий ряд ЧСС

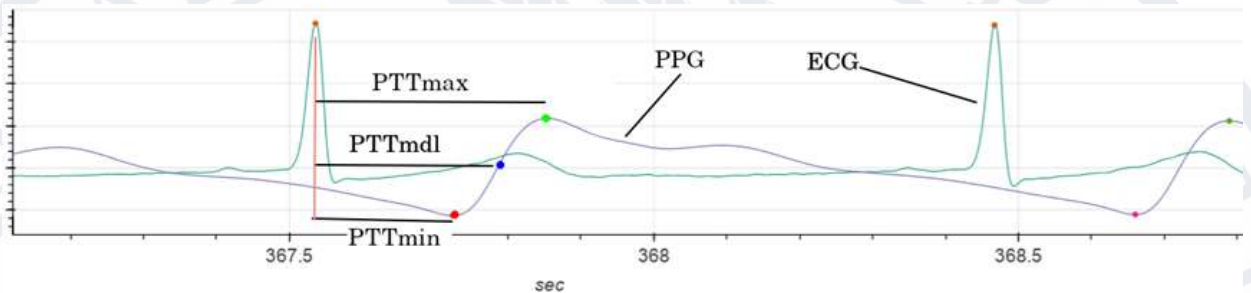


Рисунок 2.2 - Визначення часу проходження пульсової хвилі на основі сигналів ЕКГ та ФПГ

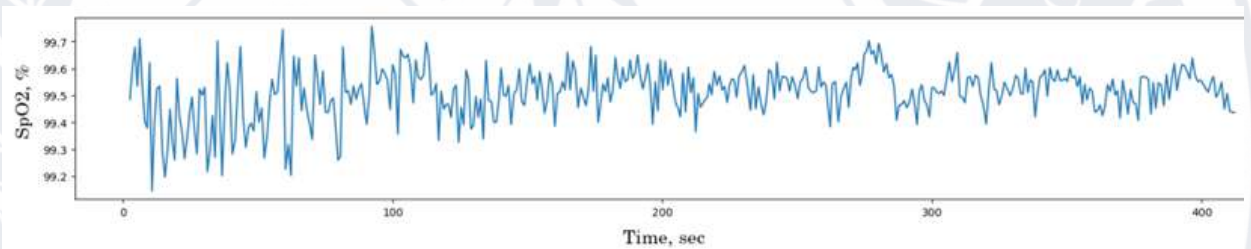


Рисунок 2.3 – Часовий ряд сатурації киснем: PTTmax, PTTmid, PTTmin

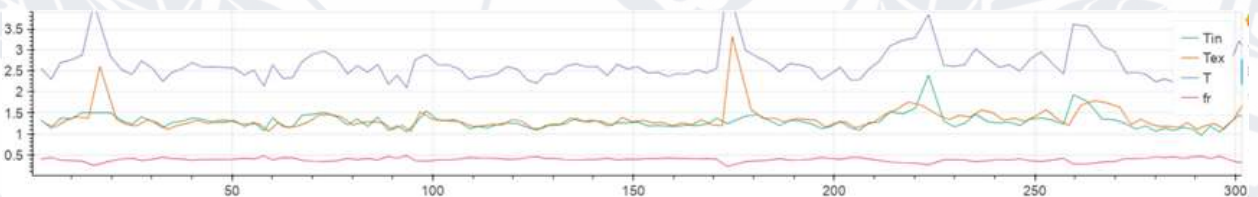


Рисунок 2.4 – Часові ряди показників, що характеризують частоту дихання

2.3 Показники ВДСР

Для оцінки показників динаміки ВДСР ми використовували необроблений часовий ряд ЧСС, а також часовий ряд ЧСС, що піддавався фільтрації (рис. 2.5). Перед фільтрацією необроблений часовий ряд ЧСС інтерполювався кубічними сплайнами, на сітці моментів часу з частотою дискретизації 10Гц. Для фільтрації використовувався фільтр Чебишева низьких частот першого роду (6 порядок, частота зрізу 0.03Гц,

нерівномірність загасання в смузі пропускання 0.001 дБ). Така фільтрація дозволяє зменшити складники в сигналі ЧСС пов'язані з диханням.

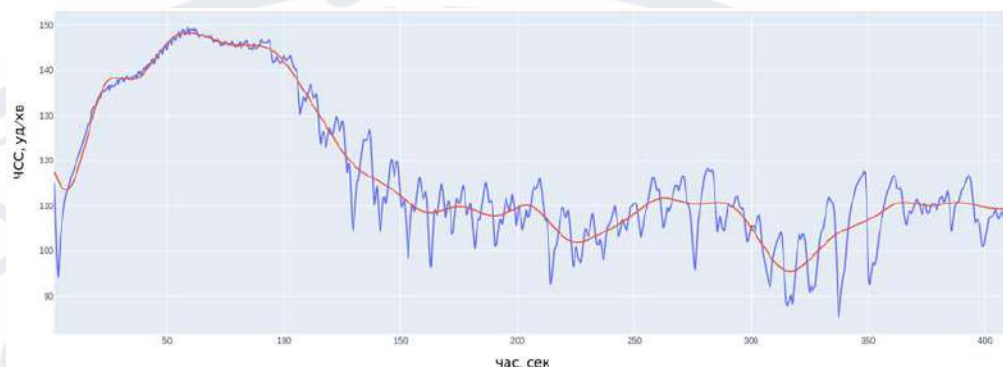


Рисунок 2.5 – Часовий ряд ЧСС до (синя крива) та після фільтрації (червона крива)

Для кількісної характеристики ВДСР після навантаження ми використовували декілька методів.

- 1) Обчислювались різниці $HRR_{ti} = HR_0 - HR_{ti}$ між значеннями ЧСС відразу після завершення вправи (HR_0) та через інтервали $t_i = \{0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5\}$. Значення ЧСС в момент часу t_i обчислювались як медіана значень ЧСС в вікні шириною 4 с (рис. 2.6).

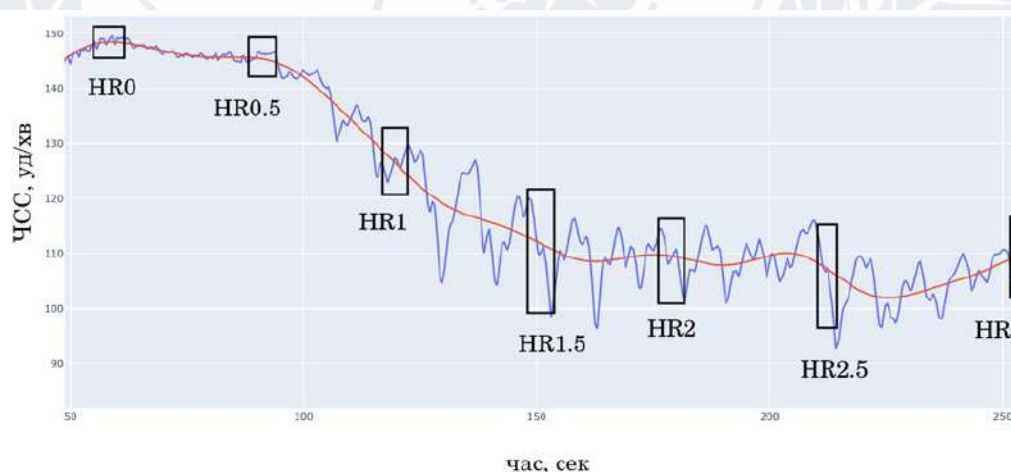


Рисунок 2.6 – Ілюстрація обчислення медіан значень ЧСС у вікні шириною 4 с, де HR_{ti} в уд/хв в момент часу t_i хвилин завершення.

Показники обчислювались для необробленого (синя крива) часового ряду ЧСС, а також ряду після інтерполяції та фільтрації (червона крива).

- 2) Обчислювались нормовані показники HRR. Для нормалізації різниць ΔHR_{ti} відносно індивідуальних відмінностей ортостатичної частоти серцевих скорочень, що спостерігаються відразу до початку вправи, оцінювались коефіцієнти відносного HRR (CHRR):

$$CHRR_{ti} = \frac{\Delta HR_{ti}}{HR_0 - HR_{init}} 100,$$

де HR_{init} – середня частота серцевих скорочень в кінці другої реєстрації (фрагмент шириною 10 сек), стоячи.

- 3) Фрагменти часового ряду ЧСС після завершення фізичної вправи припасовувались логістичною та експоненційною кривою [3233]. Параметри цих функцій кількісно характеризують динаміку ВДСР. Експоненційна функція мала наступний вигляд:

$$HR(t) = HR_{min} + (HR_{max} - HR_{min}) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

Логістична функція мала наступний вигляд:

$$HR(t) = HR_{min} + \frac{HR_{max} - HR_{min}}{1 + \exp\left\{\frac{t - t_{mdl}}{\tau}\right\}}$$

В наведених вище формулах HR_{min} та HR_{max} це максимальна та мінімальна ЧСС, τ - постійна часу (time constant), що характеризує час спадання кривих (тривалість перехідного процесу), t_{mdl} - серединна точка, момент часу де логістична крива є найкрутішою. До цієї точки спадання прискорюється, після - сповільнюється (рис. 2.7)

Попередньо логістична функція припасовувалась до фрагментів часового ряду ЧСС на таких часових інтервалах: [60, 180], [60, 200], [60, 300], [70, 180], [70, 200], [70, 300], [80, 180], [80, 200], [80, 300].

Експоненційна функція припасовувалась на таких часових інтервалах: [70, 180], [70, 200], [70, 300], [80, 180], [80, 200], [80, 300], [90, 180], [90, 200], [90, 300].

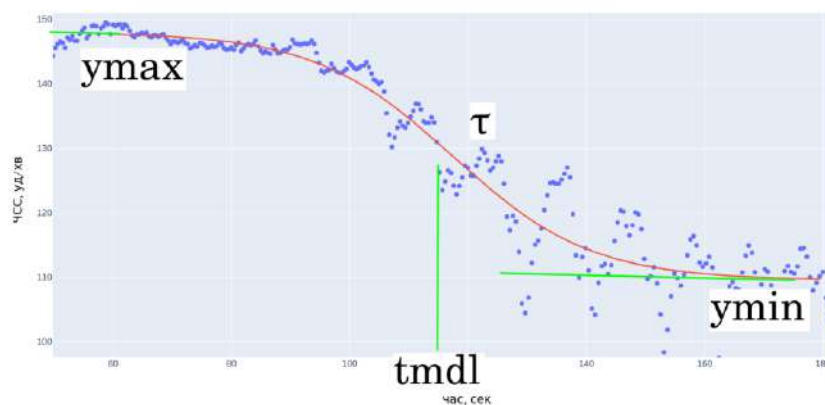


Рисунок 2.7 – Параметри логістичної функції

Оцінюючи результати припасування візуально для послідуочого аналізу було відібрано наступні часові інтервали:

1) Логістична функція: [60, 300], [60, 180] [80, 300] секунди. Такий вибір пов'язаний з тим, що іноді ЧСС продовжує зростати після завершення вправи (після 60 с), припасування логістичною кривою може не точно описувати початкові значення ЧСС після завершення. Базовий рівень ЧСС, на який вона згодом виходить, може значно відхилитись від прямої лінії, в якийсь момент базовий рівень може значно зростати або зменшуватись, вибір правої границі інтервалу впливає на результати припасування.

2) Експоненційна функція [90, 300], [90, 200], [70, 180] секунди. На початку процесу відновлення ЧСС, якщо не зростає, все одно в більшості випадків не спадає за експоненційним законом, припасування експоненти починаючи з 60 с дає незадовільний результат. Аналогічно логістичній функції, вибір правої границі інтервалу також впливає на результати припасування.

Усі розглянуті вище показники динаміки ВДСР обчислювались для необробленого часового ряду ЧСС, а також часового ряду ЧСС, що піддавався інтерполяції та фільтрації. Всі показники ВДСР представлені в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Показники ВДСР

Показник	Означення	Од. вимір.
Показники, що обчислювались на основі часових рядів ЧСС		
HRR_{t_i}	різниця ΔHR_{t_i} між значеннями ЧСС відразу після завершення вправи (HR_0) та через інтервали $t_i = \{0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5\}$ хв (HR_{t_i})	уд/хв
$CHRR_{t_i}$	коефіцієнти відносного ВДСР, $\frac{\Delta HR_{t_i}}{HR_0 - HR_{init}} 100$ де HR_{init} середня частота серцевих скорочень в кінці другого етапу експериментальної сесії	%
Показники, що обчислювались на основі допасовування експоненційної та логістичної кривої до часових рядів ЧСС		
HRR_{inf}	$HR_{max} - HR_{min}$ різниця між максимальною та мінімальною ЧСС	уд/хв
τ	постійна часу	сек
t_{mdl}	серединна точка, момент часу де логістична крива є найкрутішою	сек

2.4 Показники ВСР

Показники ВСР, що обчислювались на основі часового ряду ЧСС (зворотня величина до NN-інтервалів) наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Показники ВСР

Показник	Означення
Часовий домен, статистичні показники	
SDNN	Стандартне відхилення N-N інтервалів
IRRR	Міжквартильний діапазон N-N інтервалів

Продовження таблиці 2.2

SDANN	Стандартне відхилення середніх значень N-N сегментів довжиною window_sec секунд безперервної реєстрації ЕКГ
SDNNi	Середнє із стандартних відхилень інтервалів N-N сегментів
pNN50	Відсоток послідовних інтервалів N-N, різниця між якими перевищує 50 мс
SDSD	Стандартне відхилення різниць послідовних N-N інтервалів
mNN	Середнє значення NN інтервалів
mHR	Середній пульс
medianNN	Медіана NN інтервалів
CVNN	Стандартне відхилення інтервалів RR (SDNN), поділене на середнє значення інтервалів RR (MeanNN) SDNN/MeanNN
CVSD	Середньоквадратичний корінь послідовних різниць (RMSSD), поділений на середнє значення інтервалів RR (MeanNN) RMSSD/MeanNN
IQRNN	Міжквартильний розмах (IQR) NN інтервалів (різниця 75-го та 25-го процентилів)
SDRMSSD	Еквівалент у часовій області для співвідношення низької частоти до високої частоти (LF/HF) (Sollers та ін., 2007). SDNN/RMSSD
Частотний домен	
TP	Загальна потужність у діапазоні 0 – 0.4 Гц

Продовження таблиці 2.2

VLF	Потужність у діапазоні дуже низьких частот 0 – 0.04 Гц (Inf-25с)
LF	Потужність у діапазоні низьких частот 0.04 – 0.15 Гц (25-6.7с)
HF	Потужність у діапазоні високих частот 0.15 – 0.4 Гц (6.7-2.5с)

Для оцінки спектральних показників ВСР використовувались такі методи:

- 1) Швидке перетворення Фур'є, для оцінки спектральної густини потужності періодограма згладжувалась з використанням алгоритму Данієла.
- 2) Періодограма Ломба-Скаргла [31].

Частотні діапазони показників VLF, LF та HF:

VLF (2/350=0.0057, 0.04) Гц # (25, 175) с

LF (0.04, 0.15) Гц # (6.7, 25) с

HF (0.15, 0.4) Гц # (2.5, 6.7) с

2.5 Додаткові показники обчислені на основі ЕКГ, ФПГ та респіраторного сигналу.

Також на основі зареєстрованих сигналів ЕКГ (рис. 2.8), ФПГ (рис. 2.9) та респіраторного сигналу (рис 2.10) ми обчислювали показники, що наведено в таблицях 2.3 та 2.4.

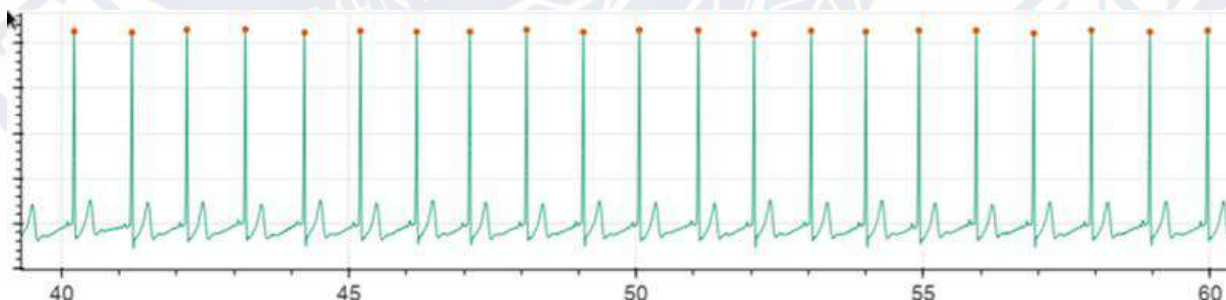


Рисунок 2.8 - Сигнал ЕКГ

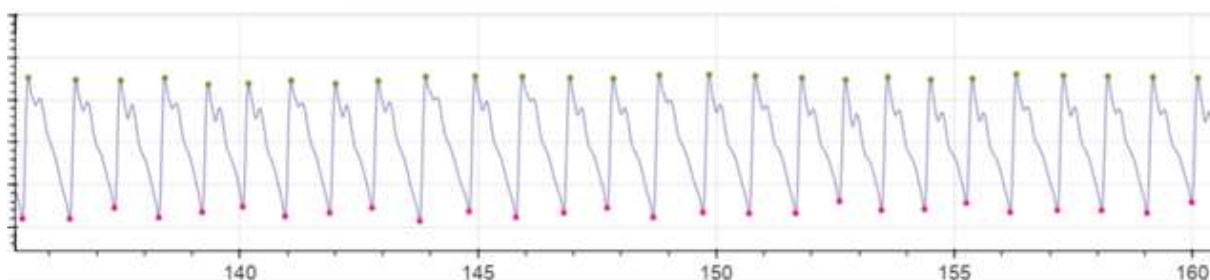


Рисунок 2.9 - Сигнал ФПГ

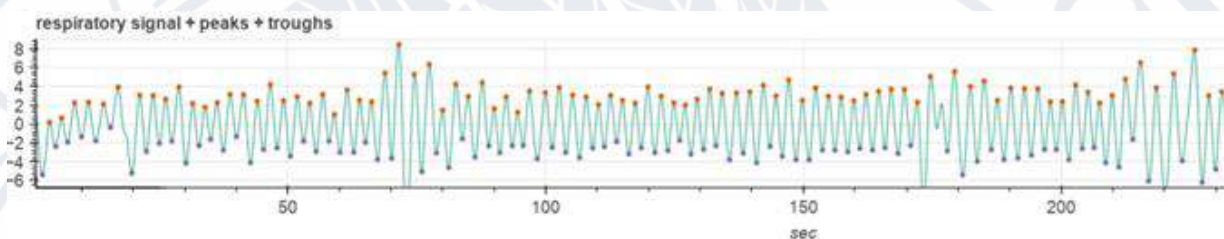


Рисунок 2.10 – Респіраторний сигнал

Таблиця 2.3 – Додаткові показники, що отримувались на основі сигналів ЕКГ, ФПГ та респіраторного сигналу, що реєструвались на етапах 1 та 2 експериментальної сесії.

Показник	Означення	Од. вимірювання
SpO2_mn	Середнє часового ряду сатурації киснем	%
SpO2_md	Медіана часового ряду сатурації киснем	%
br_fr_mn	Середня частоти дихання	Гц
br_fr_md	Медіана частоти дихання	Гц
br_fr_spec_ft	середня частоти дихання, спектральний метод	Гц
HR _{init}	Середня частота серцевих скорочень в кінці другого етапу експериментальної сесії	уд/хв

Таблиця 2.4 – Додаткові показники, що отримувались на основі сигналів ЕКГ, ФПГ та респіраторного сигналу, що реєструвались на 3 етапі експериментальної сесії.

Показник	Означення	од. вимірювання
HR_0	ЧСС відразу після завершення вправи	уд/хв
HR_{t_i}	ЧСС через інтервали $t_i = \{0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5\}$ мін після завершення вправи. Визначались двома способами: за часовим рядом ЧСС, та на основі припасованої логістичної кривої	уд/хв
HR_{min}	Мінімальна ЧСС. Визначались на основі допасованої логістичної кривої	уд/хв
HR_{max}	Максимальна ЧСС. Визначались на основі допасованої логістичної кривої	уд/хв
HR_{mdl}	Середня ЧСС. Визначались на основі допасованої логістичної кривої	уд/хв

2.6 Статистичний аналіз

Було проведено кореляційний аналіз між усіма показниками ВСР першої та другої стадій та показниками ВДСР. Нормальність даних перевірялась з використанням тесту Шапіро-Уїлка. Якщо данні були нормальними коефіцієнт кореляції оцінювався за допомогою методу Пірсон, в протилежному випадку за допомогою метода Спірмана. Використовувалась наступна система класифікації кореляції:

$|r| < 0.1$ дуже слабка (negligible)

$0.1 < |r| < 0.3$ слабка (weak)

$0.3 < |r| < 0.7$ помірна (moderate)

$0.7 < |r| < 0.9$ сильна (strong)

$|r| > 0.9$ дуже сильна (very strong)

Для порівняння показників ВСР між етапами 1 та 2 ми обчислювали 95% довірчі інтервали (ДІ) медіан їх різниць (показник ВСР етапу 2 - показник ВСР етапу 1). Для оцінки ДІ використовувався непараметричний метод бутстрепінга, з кількістю реплікацій 10000.



РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Показники ВСР сидячи та стоячи в спокої

У таблицях 3.1 та 3.2 наведена статистика показників ВСР в положеннях сидячи та стоячи. В положенні лежачі переважає парасимпатична модуляція, в положенні стоячи спостерігається помітна парасимпатична зупинка (parasympathetic withdrawal) та посилення симпатичної модуляції (sympathetic enhancement).

Таблиця 3.1 – Медіани (95% ДІ) показників ВСР сидячи та стоячи в спокої а також їх різниці. Данні для 15 піддослідних

Показник	сидячи	стоячи	зміни	зміни, %
ti, хв				
MeanNN (мс)	823,7 (756,7; 911,1)	670,8 (615,4; 714,8)	-144,6 (-159,9; 94,2)	20,1 (18,7; 21,5)
HR (уд/хв)	72,8 (65,9; 79,3)	89,4 (83,9; 97,5)	15,4 (10,1; 21,2)	25,15 (-27,3; -23)
SDNN (мс)	48,2 (35,9; 54,2)	43,7 (31,8; 53,7)	2,8 (-8,9; 5,6)	6,15 (11,4; 0,9)
CVNN	0,05 (0,04; 0,07)	0,07 (0,05; 0,08)	0,01 (-0,003; 0,02)	-19,7 (-25; -14,3)
RMSSD	29,4 (21,9; 43,3)	18,4 (10,3; 25,1)	-6,3 (-15,04; -3,5)	47,5 (53; 42)
CVSD	0,034 (0,026; 0,048)	0,03 (0,016; 0,038)	-0,004 (-0,013; 0,002)	29,7 (38,5; 20,8)
pNN50	9,1 (1,4; 21,2)	2,4 (0; 4,7)	-2,1 (-12,4; -0,1)	88,85 (99,9; 77,8)
SDRMSSD	1,6 (1,2; 2)	2,24 (1,8; 2,8)	0,5 (0,4; 0,8)	-45 (-50; -40)
TP	1605 (941,6; 2867,02)	1126,6 (607,6; 1946,6)	-182,003 (-708,8; 70,2)	33,8 (35,5; 32,1)
VLF	428,4 (216,8; 682,3)	207,3 (137,005; 546,8)	-158,08 (-365,3; -5,2)	28,4 (36,8; 19,9)
LF	555,9 (351,9; 929)	714,3 (330,8; 1035,07)	15,9 (-198,8; 368)	-2,7 (6; -11,4)

Продовження таблиці 3.1

HF	466 (129,3; 710,3)	288,3 (36,3; 420,7)	-115,4 (-422; - 30,4)	56,4 (71,9; 40,8)
LFHF	1,9 (0,9; 2,8)	3,05 (2,2; 11,9)	1,4 (0,7; 4)	-234,7 (-144,4; - 325)
LFn	66 (46,2; 73,8)	75,3 (69,1; 92,2)	11 (1,7; 19,7)	-37,3 (-49,6; - 25)
HFn	34,06 (26,2; 53,8)	24,7 (7,8; 30,9)	-11 (-19,7; -1,7)	56,4 (70,2; 42,6)

Таблиця 3.2 – Медіани (95% ДІ) показників ВСП сидячи та стоячи в спокої а також їх різниці. Данні для 16 вимірювань одного піддослідного

Показник	сидячи	стоячи	зміни	зміни, %
ВСП t _i , хв				
MeanNN (мс)	803,9 (755,07; 819,5)	614,3 (579,2; 652,5)	-189,3 (-195,5; -151,2)	21,85 (23,3; 20,4)
HR (уд/хв)	74,6 (73,2; 79,5)	97,7 (92; 103,6)	22,2 (21,005; 23,4)	-28 (-25,7; -30,3)
SDNN (мс)	46,8 (35,8; 48,6)	35,7 (29,2; 38,7)	-9,7 (-13,7; - 2,4)	19,4 (18,4; 20,4)
CVNN	0,055 (0,048; 0,063)	0,058 (0,05; 0,064)	0,002 (-0,004; 0,01)	-2,9 (-4,2; - 1,6)
RMSSD	19,3 (16,2; 25,06)	16,1 (11,2; 18,1)	-4,3 (-6,1; -3,8)	29,35 (30,9; 27,8)
CVSD	0,0263 (0,02; 0,029)	0,0262 (0,019; 0,028)	-0,0005 (- 0,005; 0,002)	4,2 (5; 3,4)
pNN50	2,2 (0,3; 4,5)	1,2 (0,4; 2)	-0,8 (-2,8; 0,2)	11,2 (-33,3; 55,6)
SDRMSSD	2,2 (2; 2,4)	2,2 (2,1; 2,6)	0,3 (-0,1; 0,4)	-6,7 (-5; - 8,3)
TP	1143,6 (844,9; 1876,3)	1005,6 (585,9; 1304,1)	-380 (-812,1; - 77,8)	39,6 (30,7; 30,5)
VLF	419,6 (280,7; 835,6)	137,3 (121; 209,1)	-272,2 (-645,5; -154,5)	66 (56,9; 75)
LF	611,9 (414,09; 922,3)	723,7 (353,4; 949,5)	-64,6 (-239,3; 106,8)	5,85 (14,7; -3)
HF	131,8 (98,7; 242,4)	124 (57,3; 166,2)	-34,7 (-88,9; 20,7)	36,6 (41,9; 31,3)

Продовження таблиці 3.2

LFHF	4,3 (2,8; 5,6)	4,7 (3,3; 6,2)	-0,03 (-0,7; 1,6)	-14,3 (-17,9; -10,7)
LFn	81,09 (73,8; 84,9)	82,3 (76,9; 86,2)	-0,08 (-3,04; 5)	-2,85 (-4,2; -1,5)
HFfn	18,9 (15,1; 26,2)	17,7 (13,8; 23,07)	0,08 (-5; 3,04)	10,3 (8,6; 11,9)

3.2 Кореляція ЧСС та показників ВСР сидячи та стоячи в спокої

Проводився кореляційний аналіз між показниками ВСР (SDNN, CVNN, RMSSD, CVSD, pNN50, SDRMSSD, TP, VLF, LF, HF, LFHF, LFn, HFfn) етапів 1 та 2 та середньою ЧСС на цих етапах. Для етапу 1 достовірна кореляція спостерігається тільки для pNN50 ($r=0.63$; $p=0.03$). Для етапу 2 кореляції відсутні.

3.3 Кореляція показників ВСР сидячи та стоячи в спокої та ЧСС після виконання вправи

Було проведено кореляційний аналіз між показниками ВСР етапів 1 та 2 з ЧСС на різних часових інтервалах етапу 3. Значення ЧСС отримувались на основі часового ряду ЧСС, а також з використанням логістичної кривої, що допасовувалась до нього для моментів 0, 0.5, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, та 5 хвилин після завершення присідань. Коефіцієнти кореляції та R-значень показників ВСР сидячи в спокої з ЧСС в різні моменти часу після виконання фізичної вправи показано в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Коефіцієнти кореляції та R-значення показників ВСР сидячи в спокої з ЧСС. Данні 15 піддослідних

	HR _{ti} (часовий ряд ЧСС)				HR _{ti} (логістична крива)				
	0	1	3	4	1	3	4	5	HR _{min}
BCP ti,xв									
HR			0.64 (0.03)						
SDNN									
CVNN									
RMSSD			-0.72 (0.01)		-0.7 (0.02)	-0.69 (0.02)	-0.68 (0.02)	-0.68 (0.02)	
CVSD			-0.64 (0.04)		-0.7 (0.02)	-0.69 (0.02)	-0.68 (0.02)	-0.62 (0.04)	
pNN50			-0.66 (0.03)		-0.65 (0.03)	-0.64 (0.03)	-0.63 (0.04)	-0.63 (0.04)	
SDRMSSD			0.64 (0.04)		0.61 (0.04)	0.63 (0.04)	0.63 (0.04)	0.63 (0.04)	
TP									
VLF									
LF									
HF			-0.61 (0.04)		-0.6 (0.04)				
LFHF									
LFn									
HFn									

Присутня кореляція із значеннями логістичної кривої. Показники частотного домену виражено не корелювали.

Таблиця 3.4 – Коефіцієнти кореляції та R-значення показників ВСР стоячи в спокої з ЧСС в різні моменти часу після виконання фізичної вправи. Данні 15 піддослідних

	HRti (часовий ряд ЧСС)				HRti (логістична крива)				
	0	1	3	4	1	3	4	5	HRmin
HR			0.67 (0.02)	0.65 (0.03)		0.61 (0.04)	0.64 (0.03)	0.65 (0.03)	0.65 (0.03)
SDNN	0.6 (0.04)								
CVNN	0.64 (0.03)								
RMSSD									
CVSD	0.64 (0.03)								
pNN50	0.71 (0.02)								
SDRMSSD		0.65 (0.03)				0.61 (0.04)			
TP	0.75 (<0.01)								
VLF	0.65 (0.03)								
LF	0.63 (0.04)								
HF	0.62 (0.04)								
LFHF		-0.64 (0.03)				-0.73 (0.01)			
LFn		-0.72 (0.01)				-0.73 (0.01)			
HFn						-0.73 (0.01)			

Спостерігається позитивна кореляція між HR_{ti} на 3, 4, 5 хвилинах та середньою ЧСС на етапі 2 (HR). Решта показників ВСР мають кореляції тільки з пульсом відразу після закінчення вправи HR₀, деякі також мають кореляцію з ЧСС на першій хвилині HR₁ (табл. 3.4). Кореляція з HR₀ спостерігається для набагато більшої кількості показників коли HR₀ була отримана з часового ряду ЧСС.

Таблиця 3.5 – Коефіцієнти кореляції та R-значення показників ВСР сидячи в спокої з ЧСС в різні моменти часу після виконання фізичної вправи. Дані 16 повторних вимірювань 1 піддослідного.

	HR _{ti} (часовий ряд ЧСС)				HR _{ti} (логістична крива)					
	0	1	3	4	1	3	4	5	HR _{m in}	HR _{m ax}
HR		0.62 (<0.01)	0.6 (<0.01)	0.63 (<0.01)	0.58 (0.02)	0.65 (<0.01)	0.66 (<0.01)	0.66 (<0.01)	0.66 (<0.01)	0.49 (0.04)
SDNN					-0.56 (0.02)					
CVNN										
RMSSD		-0.53 (0.03)			-0.69 (<0.01)					
CVSD					-0.65 (<0.01)					
pNN50		-0.51 (0.04)			-0.72 (<0.01)					
SDRMS SD		0.58 (0.01)	0.57 (0.02)	0.57 (0.02)	0.5 (0.04)	0.64 (<0.01)	0.65 (<0.01)	0.65 (<0.01)	0.65 (<0.01)	
TP					-0.67 (<0.01)					

Продовження таблиці 3.5

VLF					-0.73 (<0.01)					
LF					-0.49 (0.04)					
HF			-0.5 (0.04)		-0.69 (<0.01)					
LFHF										
LFn										
HFn										

Присутня суттєва кореляція HR із показниками ВСР і на основі часового ряду ЧСС, і з використанням логістичної кривої.

Таблиця 3.6 – Коефіцієнти кореляції та р-значення показників ВСР стоячи в спокої з ЧСС в різні моменти часу після виконання фізичної вправи. Дані 16 повторних вимірювань 1 піддослідного.

	HR _{ti} (часовий ряд ЧСС)				HR _{ti} (логістична крива)					
	0	1	3	4	1	3	4	5	HR _{m in}	HR _{m ax}
BCP t _i ,хв										
HR		0.75 (<0.01)	0.7 (<0.01)	0.77 (<0.01)	0.77 (<0.01)	0.72 (<0.01)	0.78 (<0.01)	0.78 (<0.01)	0.78 (<0.01)	0.57 (0.01)
SDNN		-0.55 (0.02)			-0.57 (0.02)					
CVNN										
RMSSD		-0.62 (<0.01)			-0.65 (<0.01)					
CVSD		-0.57 (0.02)			-0.61 (<0.01)					

Продовження таблиці 3.6

pNN50	-0.65 (<0.01)	-0.51 (0.04)		-0.7 (<0.01)					
SDRMS SD	0.49 (0.04)			0.64 (<0.01)					
TP	-0.56 (0.02)			-0.63 (<0.01)					
VLF									
LF	-0.53 (0.03)			-0.6 (0.01)					
HF	-0.53 (0.03)			-0.69 (<0.01)					
LFHF									
LFn									
HFn									

3.4 Кореляція показників ВДСР, незалежних та змішувальних змінних

В багатьох випадках абсолютні різниці (HRR_{ti}) між значеннями ЧСС відразу після завершення вправи (HR_0) та через інтервали t_i (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5 хв) (HR_{ti}) корелювали із частотою дихання (рис. 3.1-3.4). Але у випадку повторних вимірювань одного піддослідного кореляція є негативною та значно менш вираженою. Це свідчить про те, що підвищення частоти дихання призводить до повільнішого відновлення частоти серцевих скорочень.



Рис 3.1 – Коефіцієнти кореляції, що є значущими на рівні достовірності 95%, фізіологічних показників в спокої сидячи з показниками ВДСР в різні моменти часу після виконання фізичної вправи. Показники ВДСР отримувались на основі часового ряду ЧСС (ліворуч) та логістичної кривої (праворуч). Дані групи 15 піддослідних



Рис 3.2 – Коефіцієнти кореляції, що є значущими на рівні достовірності 95%, фізіологічних показників в спокої стоячи з показниками ВДСР в різні моменти часу після виконання фізичної вправи. Показники ВДСР отримувались на основі часового ряду ЧСС (ліворуч) та логістичної кривої (праворуч). Дані групи 15 піддослідних



Рис 3.3 – Коефіцієнти кореляції, що є значущими на рівні достовірності 95%, фізіологічних показників в спокої сидячи з показниками ВДСР в різні моменти часу після виконання фізичної вправи. Показники ВДСР отримувались на основі часового ряду ЧСС (ліворуч) та логістичної кривої (праворуч). Дані 16 повторних вимірювань 1 піддослідного



Рис 3.4 – Коефіцієнти кореляції, що є значущими на рівні достовірності 95%, фізіологічних показників в спокої стоячи з показниками ВДСР в різні моменти часу після виконання фізичної вправи. Показники ВДСР отримувались на основі часового ряду ЧСС (ліворуч) та логістичної кривої (праворуч). Дані 16 повторних вимірювань 1 піддослідного

3.5 Кореляція показників ВСР сидячи та стоячи в спокої та ВДСР після виконання вправи

Багато показників варіабельності корелюють із показниками відновлення серцевого ритму і ці кореляції здебільшого є позитивними. Це означає, що чим вищий базовий рівень варіабельності, тим більшим буде показник відновлення. Найбільша кількість кореляцій з ЧСС після виконання вправи спостерігається для показників ВСР сидячи, для показників ВСР стоячи такі кореляції майже відсутні. Для показників ВСР сидячи з ЧСС після виконання вправи корелюють показники, що відображають активність парасимпатичної нервової системи (RMSSD, CVSD, pNN50, HF) ці кореляції мають зворотній характер (при більшій варіабельності в спокої сидячи буде спостерігатись менші значення ЧСС стоячи). Ці кореляції мають виражений часовий характер, зазначені показники ВСР корелюють зі значеннями ЧСС з 2 по 5 хвилину після закінчення вправи. І з другого боку кореляції відсутні з показниками ЧСС з 0.5 по 1.5. Також відсутні кореляції з HR0. Ці закономірності стосуються показників ЧСС, що отримувались як на основі часового ряду ЧСС, а також з використанням логістичної кривої. Від ЧСС в спокої сидячи не залежить HR0, і спостерігаються позитивні кореляціями з деякими значеннями HRti для $t_i > 1$.

Для більшості показників ВСР в спокої стоячи наявні позитивні кореляції з HR0, (SDNN, CVNN, CVSD, pNN50, TP, VLF, LF, HF), але тільки якщо HR0 був отриманий на основі часового ряду ЧСС, для HR0, що отримувався з використанням логістичної кривої подібні кореляції не є достовірними. Також є кореляції між LF/HF, LFn, HFn та HR1. З ЧСС стоячи в спокої спостерігаються позитивні кореляції зі значеннями HRti для $t_i \geq 3$ хв.

Група піддослідних сидячи (рис. 3.5). Деякі з показників ВСР не мають достовірної кореляції з абсолютними різницями HRRti. У випадку часового ряду ЧСС це: RMSSD, SDRMSSD, pNN50. У випадку логістичної кривої:

RMSSD, CVSD, SDRMSSD, pNN50. В обох випадках, жоден з показників ВСР не має кореляції з HRR0.5 та HRR1. В цілому, з показниками HRRti, що отримувались на основі часового ряду ЧСС більше кореляцій порівняно з такими, що отримувались на основі логістичної кривої. Негативні кореляції мають тільки показники LF/HF та LFn.

Є позитивні кореляції з відносними показниками CHRRTi але тільки тоді коли вони отримувались на основі часового ряду ЧСС. Є кореляції з цими показниками для 2, 3 та 5 хвилин з багатьма показниками ВСР.



Рис 3.5 – Коефіцієнти кореляції, що є значущими на рівні достовірності 95%, показників ВСР сидючи в спокої з показниками ВДСР в різні моменти часу після виконання фізичної вправи. Показники ВДСР отримувались на основі часового ряду ЧСС (ліворуч) та логістичної кривої (праворуч). Дані групи 15 піддослідних

Група піддослідних стоячи (рис. 3.6). Порівняно з положенням сидючи збільшується кількість кореляцій з між показниками HRRti та ВСР, за виключенням показників LF/HF, LFn та HFn. Для останніх кореляції з HRRti відсутні. На відміну від сидячого положення з'являються кореляції з HRR0.5 та HRR1. Їх більше для HRRti, що отримувались на основі часового ряду ЧСС. Кореляції SDRMSSD з HRRti, що з'являються в цьому положенні, негативні, кореляції решти показників ВСР - позитивні.

Спостерігається певна залежність величини коефіцієнтів кореляції від часу показників HRRti. Вони стають більшим приблизно в інтервалі 1.5-3 хв.

Є позитивні кореляції з відносними показниками CHRRTi. На відміну від положення сидячи, вони з'являються і для CHRRTi що отримувались на основі логістичної кривої. На відміну від положення сидячи кореляцій на 2, 3 та 5 хвилинах стає менше, є багато кореляцій для CHR0.5. Для CHRRTi що отримувались на основі логістичної кривої кореляції існують для 0.5-1.5 хвилин.



Рис 3.6 – Коефіцієнти кореляції, що є значущими на рівні достовірності 95%, показників ВСР стоячи в спокої з показниками ВДСР в різні моменти часу після виконання фізичної вправи. Показники ВДСР отримувались на основі часового ряду ЧСС (ліворуч) та логістичної кривої (праворуч). Дані групи 15 піддослідних

Повторні вимірювання одного піддослідного. В усіх випадках міняється часовий характер, з'являється більша кількість кореляцій з HRRti 0.5, 1 хв і зменшується кількість при ≥ 1.5 хв. Спостерігається домінування кореляцій показників ВСР парасимпатичної модуляції за кількістю та величиною коефіцієнтів кореляції.

На рівні одного піддослідного ситуація дещо відрізняється. Основні відмінності для кореляцій показників ВСП сидячи полягають в зміні часового характеру, тут вони переважно корелюють з показниками ЧСС 1-ї, 1.5-ї та 2-ї хвилин після закінчення вправи (на рівні групи 2- 5 хвилини). Для показників ВСП в спокої стоячи відмінність в тому, що з'являється значна кількість кореляцій і вони не корелюють з HR0, що отримувався на основі необробленого часового ряду ЧСС. Розглянемо це детальніше. Всі показники ВСП в спокої сидячи окрім CVNN мають зворотні кореляції з HR1, що отримувався на основі логістичної кривої та HR1.5 що отримувався з необробленого ряду ЧСС. Окремі показники також корелюють з HR0.5, HR2. Є тенденція, що більшу кількість кореляцій і більші коефіцієнти кореляцій мають показники RMSSD, CVSD, pNN50, HF та VLF. Як і у випадку групи, кореляції з HR0 відсутні. ЧСС в спокої сидячи позитивно корелює майже з усіма HRti для ti>0. Всі показники ВСП в спокої стоячи мають негативні кореляції з тими чи іншими показниками HRti. Переважна кількість кореляцій спостерігається з показниками HRti від 0.5 до 1.5 хвилини. ЧСС в спокої стоячи позитивно корелює з усіма HRti для ti>0. На відміну від групи піддослідних виникає значна негативна кореляція між HR сидячи та стоячи та майже усіма HRRti. З'являється більша кількість кореляцій з HRRti 0.5, 1 хв і зменшується кількість при ≥ 1.5 хв.

Порівняно з групою, для показників CHRRti з'являються або збільшується кількість кореляцій для моментів часу 0.5, 1 хв і зменшується/зникають для часу ≥ 1.5 хв.

Сидячи (рис. 3.7). Порівняно з групою збільшується кількість кореляцій з між показниками HRRti та ВСП. Збільшується кількість кореляцій для показників ВСП RMSSD, pNN50, HF, причому завдяки кореляціям з HRRti 0.5, 1 хв (отриманих як через часовий ряд ЧСС так і логістичну криву).



Рис 3.8 – Коефіцієнти кореляції, що є значущими на рівні достовірності 95%, показників ВСР стоячи в спокої з показниками ВДСР в різні моменти часу після виконання фізичної вправи. Показники ВДСР отримувались на основі часового ряду ЧСС (ліворуч) та логістичної кривої (праворуч). Дані 16 повторних вимірювань 1 піддослідного



Рисунок 3.9 – Коефіцієнти кореляції, що є значущими на рівні достовірності 95%, показників ВСР сидячи в спокої з параметрами логістичної кривої. Дані групи 15 піддослідних



Рисунок 3.10 – Коефіцієнти кореляції, що є значущими на рівні достовірності 95%, показників ВСР стоячи в спокої з параметрами логістичної кривої. Дані групи 15 піддослідних

На рівні одного піддослідного кореляцій більше. Зокрема сидячи було виявлено негативні кореляції між сталою часу (τ) та показниками SDNN, CVNN, CVSD, VLF, HF та TP, негативні кореляції середньої ЧСС (HRmdl) з показниками RMSSD, pNN50, VLF, TP та позитивну з LFn (рис. 3.11).

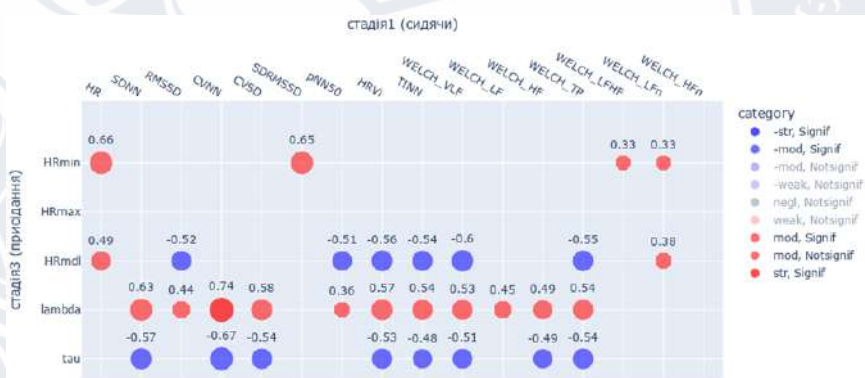


Рисунок 3.11 – Коефіцієнти кореляції, що є значущими на рівні достовірності 95%, показників ВСР сидячи в спокої з параметрами логістичної кривої. Дані 16 повторних вимірювань 1 піддослідного

Стоячи спостерігаються здебільшого негативні кореляції між середніми ЧСС (HRmdl) з показниками SDNN, RMSSD, CVSD, pNN50, LF, HF і TP та позитивну з SDRMSSD (рис. 3.12).

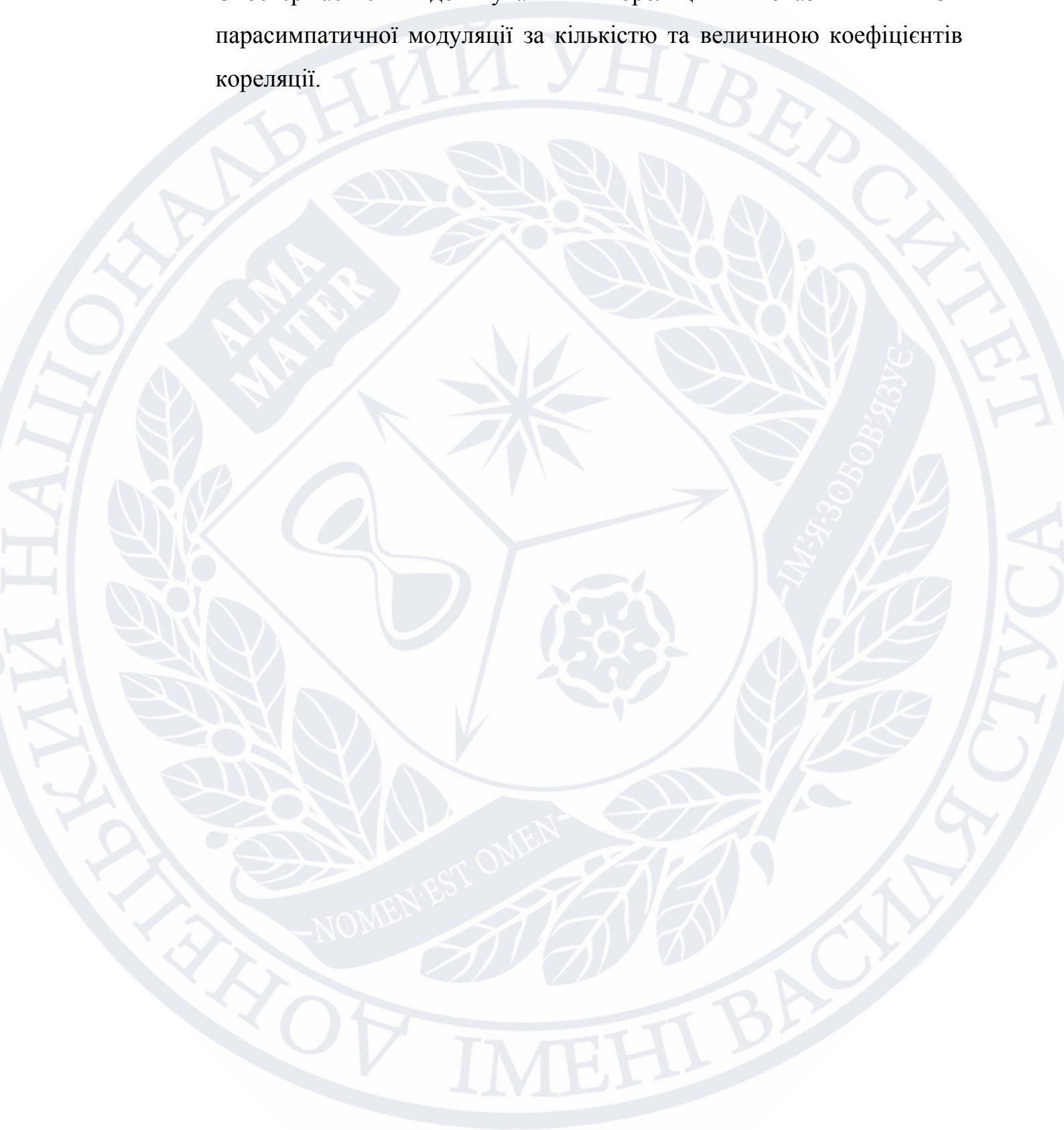


Рисунок 3.12 – Коефіцієнти кореляції, що є значущими на рівні достовірності 95%, показників ВСР стоячи в спокої з параметрами логістичної кривої. Дані 16 повторних вимірювань 1 піддослідного

ВИСНОВКИ

1. В межах обраного експериментального протоколу були отримані експериментальні дані для 15 піддослідних, для одного з них були здійснені 16 повторних вимірювань. Проведено обробку даних, результатом якої стала оцінка показників варіабельності серцевого ритму (SDNN, CVNN, RMSSD, CVSD, pNN50, TP, VLF, LF, HF, HF_n) в спокої в положенні сидячи та лежачи та показників відновлення серцевого ритму (HRR_{ti}) в різні моменти часу ($t_i=0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5$ хв) після завершення фізичної вправи.
2. Проведено кореляційний аналіз між показниками ВСР в спокої сидячи та стоячи з абсолютними (HRR_{ti}) показниками ВДСР. Достовірні кореляції для усіх показників ВСР носять позитивний характер, виключенням є LF/HF та LF_n, для них кореляції є негативними.
3. Якщо ВДСР після фізичної вправи оцінюється в положенні стоячи, вибір положення для оцінки ВСР має істотний вплив на результати кореляційного аналізу. Порівняно з положенням сидячи в положенні стоячи збільшується кількість достовірних кореляцій між показниками HRR_{ti} та ВСР, за виключенням показників LF/HF, LF_n та HF_n. Для останніх кореляції з HRR_{ti} навпаки відсутні. Також на відміну від сидячого положення з'являються кореляції з HRR_{0.5} та HRR₁.
4. В дослідженні взаємозв'язку між ВСР в стані спокою та ВДСР є важливим спосіб оцінки показників ВДСР. Результати можуть істотно відрізнитись коли показників ВДСР оцінюються на основі часового ряду ЧСС після фізичної вправи або на основі згладжуючої логістичної кривої допасованої до цього ряду.
5. Для одного піддослідного, на відміну від групи, з'являється більша кількість кореляцій показників ВСР в спокої сидячи та стоячи з показниками ВДСР 0.5-ої та 1-ої хв і зменшується кількість кореляцій

та величина кореляції з показниками ВДСР від 1.5-ої до 5 хвилини. Спостерігається домінування кореляцій показників ВСР парасимпатичної модуляції за кількістю та величиною коефіцієнтів кореляції.



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. White D. W., Raven P. B. Autonomic neural control of heart rate during dynamic exercise: revisited. *J. Physiol.* 2014. Vol. 592. P. 2491–2500.
2. Weippert M., Behrens M., Gonschorek R., Bruhn S., Behrens K. Muscular contraction mode differently affects autonomic control during heart rate matched exercise. *Front. Physiol.* 2015. Vol. 6. P. 156.
3. Vink E. E., De Jager R. L., Blankestijn P. J. Sympathetic hyperactivity in chronic kidney disease: pathophysiology and (new) treatment options. *Curr. Hypertens. Rep.* 2013. Vol. 15. P. 95–101.
4. Teixeira L., Ritti-Dias R. M., Tinucci T., Mion Junior D., De Moraes Forjaz C. L. Post-concurrent exercise hemodynamics and cardiac autonomic modulation. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2011. Vol. 111. P. 2069–2078.
5. Stanley J., Peake J. M., Buchheit M. Cardiac parasympathetic reactivation following exercise: implications for training prescription. *Sports Med.* 2013. Vol. 43. P. 1259–1277.
6. Shanks J., Herring N. Peripheral cardiac sympathetic hyperactivity in cardiovascular disease: role of neuropeptides. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 2013. Vol. 305. P. 1411–1420.
7. Schwartz P. J., De Ferrari G. M. Sympathetic-parasympathetic interaction in health and disease: abnormalities and relevance in heart failure. *Heart Fail. Rev.* 2011. Vol. 16. P. 101–107.
8. Sacha J. Interaction between heart rate and heart rate variability. *Ann. Noninvasive Electrocardiol.* 2014. Vol. 19. P. 207–216.
9. Sacha J. Why should one normalize heart rate variability with respect to average heart rate. *Front. Physiol.* 2013. Vol. 4. P. 306.
10. Ranadive S. M., Fahs C. A., Yan H., Rossow L. M., Agliovlastis S., Fernhall B. Heart rate recovery following maximal arm and leg-ergometry. *Clin. Auton. Res.* 2011. Vol. 21. P. 117–120.

11. Pradhapan P., Tarvainen M. P., Nieminen T., Lehtinen R., Nikus K., Lehtimäki T. Effect of heart rate correction on pre- and post-exercise heart rate variability to predict risk of mortality - an experimental study on the FINCAVAS cohort. *Front. Physiol.* 2014. Vol. 5. P. 208.
12. Pecanha T., Silva-Junior N. D., De Moraes Forjaz C. L. Heart rate recovery: autonomic determinants, methods of assessment and association with mortality and cardiovascular diseases. *Clin. Physiol. Funct. Imaging.* 2014. Vol. 34. P. 327–339.
13. Moreno I. L., Pastre C. M., Ferreira C., De Abreu L. C., Valenti V. E., Marques Vanderlei L. C. Effects of an isotonic beverage on autonomic regulation during and after exercise. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* 2013. Vol. 10. P. 2.
14. Michelini L. C., O'leary D. S., Raven P. B., Nobrega A. C. L. Neural control of circulation and exercise: a translational approach disclosing interactions between central command, arterial baroreflex, and muscle metaboreflex. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2015. Vol. 309. P. 381–392.
15. Michael S., Jay O., Halaki M., Graham K., Davis G. M. Submaximal exercise intensity modulates acute post-exercise heart rate variability. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2016. Vol. 116. P. 697–706.
16. Souza H.C.D., Philbois S.V., Veiga A.C., Aguilar BA. Heart Rate Variability and Cardiovascular Fitness: What We Know so Far. *Vasc Health Risk Manag.* 2021. Vol. 13. P. 701-711.
17. Ernst G. Heart-Rate Variability-More than Heart Beats? *Front Public Health.* 2017. Vol. 11. P. 240.
18. Tao D., He Y., Cole A., Awan-Scullycully R., Gao Y. The benefits of Heart Rate Variability (HRV) in the assessment of health and exercise performance. *Imaging J Clin Medical Sci.* 2022. Vol. 9. P. 11-14.
19. Michelini L. C., O'leary D. S., Raven P. B., Nobrega A. C. L. Neural control of circulation and exercise: a translational approach disclosing interactions

- between central command, arterial baroreflex, and muscle metaboreflex. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2015. Vol. 309. P. 381–392.
20. Michael S., Jay O., Halaki M., Graham K., Davis G. M. Submaximal exercise intensity modulates acute post-exercise heart rate variability. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2016. Vol. 116. P. 697–706.
21. Lunt H. C., Corbett J., Barwood M. J., Tipton M. J. Cycling cadence affects heart rate variability. *Physiol. Meas.* 2011. Vol. 32. P. 1133–1145.
22. Karapetian G. K., Engels H. J., Gretebeck K. A., Gretebeck R. J. Effect of Caffeine on LT, VT and HRVT. *Int. J. Sports Med.* 2012. Vol. 33. P. 507–513.
23. Kaikkonen P., Hynynen E., Mann T., Rusko H., Nummela A. Heart rate variability is related to training load variables in interval running exercises. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2012. Vol. 112. P. 829–838.
24. Garcia-Tabar I., Sánchez-Medina L., Aramendi J. F., Ruesta M., Ibañez J., Gorostiaga E. M. Heart rate variability thresholds predict lactate thresholds in professional world-class road cyclists. *J. Exerc. Physiol. Online.* 2013. Vol. 16. P. 38–50.
25. Fisher J. P., Young C. N., Fadel P. J. Autonomic adjustments to exercise in humans. *Compr. Physiol.* 2015. Vol. 5. P. 475–512.
26. Fadel P. J. Reflex control of the circulation during exercise. *Scand. J. Med. Sci. Sports.* 2015. Vol. 25. P. 74–82.
27. Dupuy O., Mekary S., Berryman N., Bherer L., Audiffren M., Bosquet L. Reliability of heart rate measures used to assess post-exercise parasympathetic reactivation. *Clin. Physiol. Funct. Imaging.* 2012. Vol. 32. P. 296–304.
28. Casonatto J., Tinucci T., Dourado A. C., Polito M. Cardiovascular and autonomic responses after exercise sessions with different intensities and durations. *Clinics.* 2011. Vol. 66. P. 453–458.

29. Brindle R. C., Ginty A. T., Phillips A. C., Carroll D. A tale of two mechanisms: a meta-analytic approach toward understanding the autonomic basis of cardiovascular reactivity to acute psychological stress. *Psychophysiology*. 2014. Vol. 51. P. 964–976.
30. Boulosa D. A., Nakamura F. Y., Perandini L. A., Leicht A. S. Autonomic correlates of Yo-Yo performance in soccer referees. *Motriz Rev. Educacao Fisica*. 2012. Vol. 18. P. 291–297.
31. Bartels-Ferreira R. Can a first-order exponential decay model fit heart rate recovery after resistance exercise? / R. Bartels-Ferreira, É. D. de Sousa, G. A. Trevizani, [et al.] // *Clinical Physiology and Functional Imaging*. — 2015. — Vol. 35, No. 2. — P. 98–103.
32. Perini R. Plasma norepinephrine and heart rate dynamics during recovery from submaximal exercise in man / R. Perini, C. Orizio, A. Comandè, [et al.] // *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*. — 1989. — Vol. 58, No. 8. — P. 879–883.
33. Pierpont G. L. Heart rate recovery post-exercise as an index of parasympathetic activity / G. L. Pierpont, D. R. Stolpman, C. C. Gornick // *Journal of the Autonomic Nervous System*. — 2000. — Vol. 80, No. 3. — P. 169–174.
34. Javorka M. Heart rate recovery after exercise: relations to heart rate variability and complexity / M. Javorka, I. Zila, T. Balhárek, K. Javorka // *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*. — 2002. — Vol. 35. — P. 991–1000.
35. Bosquet L. Is aerobic endurance a determinant of cardiac autonomic regulation? / L. Bosquet, F.-X. Gamelin, S. Berthoin // *European Journal of Applied Physiology*. — 2007. — Vol. 100, No. 3. — P. 363–369.
36. Cunha F. A. Parasympathetic reactivation after maximal cpet depends on exercise modality and resting vagal activity in healthy men / F. A. Cunha, A. W. Midgley, T. Gonçalves, [et al.] // *SpringerPlus*. — 2015. — Vol. 4. — P. 100.

37. Jae S. Y. Relation of heart rate recovery to heart rate variability in persons with paraplegia / S. Y. Jae, K. S. Heffernan, M. Lee, B. Fernhall // *Clinical Autonomic Research*. — 2011. — Vol. 21, No. 2. — P. 111–116.
38. Nunan D. Resting autonomic modulations and the heart rate response to exercise / D. Nunan, D. G. Jakovljevic, G. Donovan, [et al.] // *Clinical Autonomic Research*. — 2010. — Vol. 20, No. 4. — P. 213–221.
39. Chen J. Y. Cardiac autonomic functions derived from short-term heart rate variability recordings associated with heart rate recovery after treadmill exercise test in young individuals / J. Y. Chen, Y. L. Lee, W. C. Tsai, [et al.] // *Heart and Vessels*. — 2011. — Vol. 26, No. 3. — P. 282–288.
40. Lee C. M. Dissociation of heart rate variability and heart rate recovery in well-trained athletes / C. M. Lee, A. Mendoza // *European Journal of Applied Physiology*. — 2012. — Vol. 112, No. 7. — P. 2757–2766.
41. Antelmi I. Heart rate recovery after treadmill electrocardiographic exercise stress test and 24-hour heart rate variability in healthy individuals / I. Antelmi, E. Y. Chuang, C. J. Grupi, [et al.] // *Arquivos Brasileiros de Cardiologia*. — 2008. — Vol. 90. — P. 413–418.
42. Esco M. R. The relationship between resting heart rate variability and heart rate recovery / M. R. Esco, M. S. Olson, H. N. Williford, [et al.] // *Clinical Autonomic Research*. — 2010. — Vol. 20, No. 1. — P. 33–38.
43. Carnethon M. R. Correlates of the shift in heart rate variability with an active postural change in a healthy population sample: the atherosclerosis risk in communities study / M. R. Carnethon, D. Liao, G. W. Evans, [et al.] // *American Heart Journal*. — 2002. — Vol. 143, No. 5. — P. 808–813.
44. Carnethon M. R. Does the cardiac autonomic response to postural change predict incident coronary heart disease and mortality? : the atherosclerosis risk in communities study / M. R. Carnethon, D. Liao, G. W. Evans, [et al.] // *American Journal of Epidemiology*. — 2002. — Vol. 155, No. 1. — P. 48–56.

45. Grant C. C. Heart rate variability assessment of the effect of physical training on autonomic cardiac control / C. C. Grant, M. Viljoen, D. C. Janse van Rensburg, P. S. Wood // *Annals of Noninvasive Electrocardiology : The Official Journal of the International Society for Holter and Noninvasive Electrocardiology, Inc.* — 2012. — Vol. 17, No. 3. — P. 219–229.

