

DOI: 10.26693/jmbs05.03.417

УДК 612.172.2

Завгородня В. А., Вітько С. М.,
Кудій Л. І., Коваленко С. О.

АНАЛІЗ ВАРІАБЕЛЬНОСТІ СЕРЦЕВОГО РИТМУ ПРИ ГІПОКАПНІЇ ДИХАННЯ У МОЛОДИХ ЧОЛОВІКІВ

Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького,
Україна

Victoria_Myronyuk@ukr.net

Оцінка показників варіабельності серцевого ритму складає наукове підґрунтя у прогнозуванні фізичних можливостей та контролю функціонального стану людини. Встановлено, що різні патерни дихання суттєво впливають на структуру ритму серця. Тому метою дослідження є вивчення індивідуальних особливостей варіабельності серцевого ритму при диханні із частотою 30 циклів за хвилину у здорових молодих чоловіків. Було проведено реєстрацію записів капнограми дихання на капнографі DATEX NORMOCAP (Datex, Finland) та кардіоінтервалограм за допомогою кардіодатчика Polar W.I.N.D. Link, приймачем Polar Wearlink W.I.N.D у програмі Polar Protrainer 5.0 (Polar Electro OY, Finland) у 78 здорових молодих чоловіків. Аналіз записів ритмограм свідчить про наявність індивідуальних особливостей серцевого ритму та його змін при гіпервентиляційній пробі.

Під час гіпокапнії тривалість R-R інтервалів, рівень SDNN, rMSSD та показники потужності їх спектру знижуються. На 40-й хвилині відновлення спостерігається збільшення їх рівня від фону. Однак рівень максимального піку у спектрі низьких частот серцевого ритму (tLF) після гіпервентиляції не відновлюється.

У осіб з різним вихідним рівнем PetCO₂ як у стані спокою, так і при гіпокапнії відмічено вищі значення SDNN та rMSSD у представників з середнім та високим його рівнем. Під час відновлення різниця досліджуваних статистичних показників між групами нівелюється. При аналізі хвильової структури серцевого ритму у фоні спостерігається вірогідна різниця tLF між чоловіками з низьким та високим рівнем PetCO₂, а також наприкінці відновлення між особами з низьким його рівнем та середнім.

Серед чоловіків з різним вихідним рівнем вегетативного тону у стані спокою, під час гіпервентиляції та у період відновлення найбільші значення досліджуваних параметрів спостерігаються у парасимпатотоніків. При гіпокапнії чіткі відмінності між групами нівелюються за винятком наступних показників: у нормотоніків спостерігали вірогідну різницю

HF_{norm}, а ваготоніки – мали вищі значення як HF_{norm}, так і HF порівняно із симпатотоніками.

Отже, зміни статистичних показників серцевого ритму та його спектральних компонентів при гіпокапнії дихання мають суттєві індивідуальні відмінності. Одним з чинників, що обумовлюють їх може бути вихідний рівень PetCO₂ та вегетативного тону.

Ключові слова: варіабельність серцевого ритму, вегетативний тонус, PetCO₂, гіпервентиляція, гіпокапнія.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукова робота є фрагментом НДР за темою «Вплив гіпо- та гіперкапнії на функціональний стан серцево-судинної системи людини», № держ. реєстрації 0116U003829.

Вступ. З'ясування впливу зовнішнього дихання на серцево-судинну систему до сьогодні належить до списку актуальних проблем біології та медицини. У зв'язку зі збільшенням стресового впливу, гіпервентиляція стала одним з факторів, який супроводжує сучасне життя [1] та викликає гіпокапнію. Однак аналіз наукової літератури показує більшу цікавість щодо впливу уповільненого дихання на організм в цілому та на серцевий ритм зокрема [2, 3], а питання гіпервентиляції вивчені недостатньо. Клінічні та експериментальні дослідження свідчать про те, що в однотипних умовах нервово-емоційного напруження виявляються виразні індивідуальні відмінності в стійкості людей до певних факторів зовнішнього і внутрішнього середовища [4]. Досліджено, що для ідентифікації гострого стресу інформативним показником є потужність спектру варіабельності серцевого ритму (BCP) в діапазоні дуже високих частот [5]. Загалом оцінка показників BCP складає наукове підґрунтя у прогнозуванні фізичних можливостей та контролю функціонального стану людини [6, 7]. Встановлено, що різні патерни дихання по-різному впливають на серцевий ритм [6]. Отже, аналіз BCP дозволяє встановити певні закономірності його вегетативної

регуляції та дозволяє через відповідну реакцію визначити вплив того чи іншого чинника.

Метою дослідження було вивчити індивідуальні особливості варіабельності серцевого ритму при диханні із частотою 30 циклів за хвилину у здорових молодих чоловіків.

Матеріал та методи дослідження. Дослідження проводили серед студентів Черкаського національного університету імені Б. Хмельницького факультету фізичної культури, спорту і здоров'я з дотриманням основних біоетичних положень Конвенції Ради Європи про права людини та біомедицину (від 04.04.1997 р.), Гельсінської декларації Всесвітньої медичної асоціації про етичні принципи проведення наукових медичних досліджень за участю людини (1994-2008 рр.), а також наказу МОЗ України № 690 від 23.09.2009 року. Дослідження виконувалося з мінімальними психологічними втратами з боку учасників. На проведення досліджень була отримана поінформована згода кожного учасника дослідження.

Вимірювання здійснені на 78 чоловіках віком 18-22 роки.

Спочатку здійснювали вимірювання досліджуваних показників 5 хвилин у спокої сидячи після 10-хвилинного відпочинку, потім – упродовж 10 хвилин регламентованого дихання з частотою 30 циклів за хвилину та 40 хвилин відновного періоду після тесту.

Проводили записи капнограми дихання та кардіоінтервалограм. Капнограму реєстрували на капнографі DATEX NORMOCAP (Datex, Finland) у бочковому потоці та оцінювали рівень напруження CO₂ вкінці видиху (PetCO₂). Запис варіабельності серцевого ритму (BCP) проводили за допомогою кардіодатчика Polar W.I.N.D. Link приймачем Polar Wearlink W.I.N.D. та аналізували у програмі Polar Protrainer 5.0 (Polar ElectroOY, Finland). Після реєстрації кардіоінтервалограм здійснювали їх обробку у програмі "Caspico" (а.с. України №11262). За 5-хвилинними записами кардіоінтервалограм в спокої та при експериментальних впливах оцінювали хвильову структуру серцевого ритму. Згідно зі стандартами Європейського кардіологічного товариства за спектрограмою серцевого ритму визначали:

- a. TP – загальна потужність коливань N-N інтервалів, яка вимірюється у частотному діапазоні до 0,4 Гц протягом 5 хв та є показником загальної BCP (сума значень VLF, LF та HF).
- b. HF – 0,15-0,4 Гц – потужність коливань серцевого ритму в діапазоні високих частот, яка свідчить про рівень дихальної аритмії та парасимпатичний вплив на серцевий ритм. Абсолютна величина дихальної складової спектру, як правило, дорівнює близько

1000 мс² та складає 15-25% від сумарної потужності.

- c. HF_{norm} – HF в нормалізованих одиницях, що показує відносну парасимпатичну активність, тобто відображає рівень вагосимпатичного балансу. Розраховували за формулою: $HF_{norm} = (HF / (HF + LF)) * 100\%$.
- d. LF – 0,04-0,15 Гц – відображає низькочастотну складову BCP, що характеризує симпатичний тонус. В нормі частка вазомоторних хвиль в положенні лежачи становить від 15 до 35-40%.
- e. VLF – 0-0,04 Гц – потужність коливань серцевого ритму в діапазоні дуже низьких частот, яка відображає гуморальні впливи на ритм серця, активність центрів осциляторів, коливання метаболізму. В нормі за умов спокою потужність в діапазоні цих частот складає 15-35% від сумарної потужності спектру.

Крім цього, визначали tLF – частоту найбільшого за амплітудою піку на спектрограмі в діапазоні низьких частот.

Оскільки при аналізі хвильової структури спостерігався непараметричний розподіл – розраховували медіани та їх кuartили з визначенням відмінностей за U-критерієм Mann-Whitney.

Зі статистичних показників варіабельності серцевого ритму аналізували:

- a. SDNN – стандартне відхилення інтервалів N-N, що відображає сумарну BCP. Вважається, що вищі значення SDNN (за умови відсутності аритмій та виражених трендів) свідчать про більш високі функціональні можливості організму.
- b. rMSSD – стандартне (середнє квадратичне) відхилення різниці послідовних N-N інтервалів, що є виміром BCP з малою тривалістю циклів та відображає парасимпатичну активність.

Розподіл статистичних показників був нормальним, тому здійснювали аналіз вибірок параметричними методами з розрахунком середніх значень та їх помилки. Вірогідність відмінностей оцінювали за t-критерієм Student's для групових та парних порівнянь у програмі Statistica for Windows 5.0.

Реактивність фізіологічних показників визначали як різницю між їх рівнем при експериментальних впливах та у фоні.

Результати дослідження та їх обговорення

Візуальний аналіз записів ритмограм досліджуваних молодих чоловіків у спокої, під час гіпервентиляції та на 35-40 хвилині відновлення.

Серед досліджених осіб індивідуальні значення хвильової структури ритму серця суттєво відрізнялись, що виявилось ще на етапі візуального аналізу нативних записів ритмограм. На рисунках 1-3 представлені оригінальні записи R-R інтервалів досліджуваних №41, №61 і № 71.

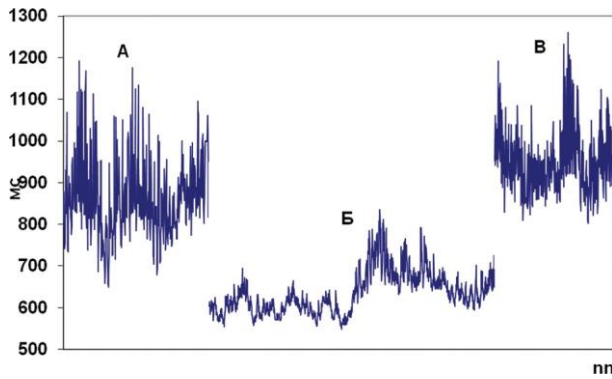


Рис. 1. Нативний запис R-R інтервалів обстежуваного №41

Примітки: А – спокій; Б – гіпервентиляція з частотою 30 циклів за хвилину; В – 35-40 хвилина відновлення.

Аналіз даних обстежуваного №41 (рис. 1) свідчить про значну амплітуду варіабельності серцевого ритму у період спокою з чітко вираженою хвильовою структурою. Так як у наших попередніх дослідженнях виявлено [8], що при диханні з частотою 30 циклів за хвилину упродовж 10 хвилин рівень $PetCO_2$ знижується з $40,12 \pm 0,361$ мм рт. ст. до $18,59 \pm 0,542$ мм рт. ст., тобто відмічена виражена гіпокапнія під час проби, під її впливом спостерігається різка зміна хвильової структури та різниця ВСП протягом першої та другої половини тесту. Період відновлення характеризується збільшенням ЧСС та незначним зменшенням варіабельності у порівнянні з фоном. Загалом цей запис ВСП свідчить про значні зміни хвильової структури серцевого ритму під час тесту та впродовж періоду відновлення.

Ритмограма обстежуваного №61 (рис. 2) різко відрізняється від попередньої: під час тесту зареєстровано чітко виражену хвильову структуру, хоча спостерігається менша реактивність порівняно з

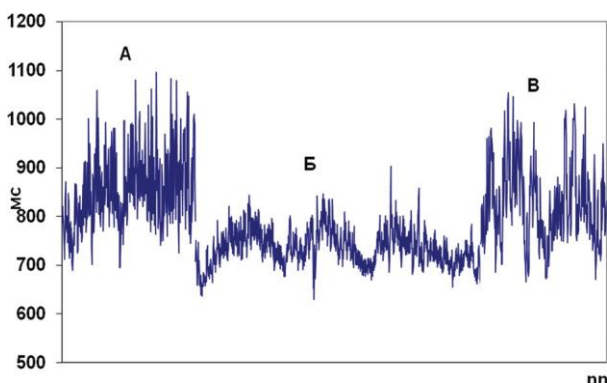


Рис. 2. Оригінальний запис R-R інтервалів обстежуваного №61

Примітки: А – спокій; Б – гіпервентиляція з частотою 30 циклів за хвилину; В – 35-40 хвилина відновлення.

досліджуваним №41. При візуальному аналізі помітні як регулярні хвилі, так і поодинокі аперіодичні зрушення. Відмічено зменшення ЧСС під час гіпокапнії та після неї проти стану спокою.

Разом з тим обидва обстежуваних були однакового віку, не мали хронічних чи гострих захворювань, вели подібний спосіб життя. Можливо, особливості структури ритмограм відображають специфічні для кожного з них особливості регуляторних впливів на серце та їх змін при пробі.

Запис R-R інтервалів обстежуваного №71 (рис. 3) свідчить про незначну варіабельність ритму серця у спокої, збільшення ВСП під час тесту, цілком можливо за рахунок дихальних рухів, далі – хоч і відбувається наростання гіпокапнії, амплітуда ритму серця відновлюється. Після регламентованого дихання спостерігається збільшення варіабельності серцевого ритму.

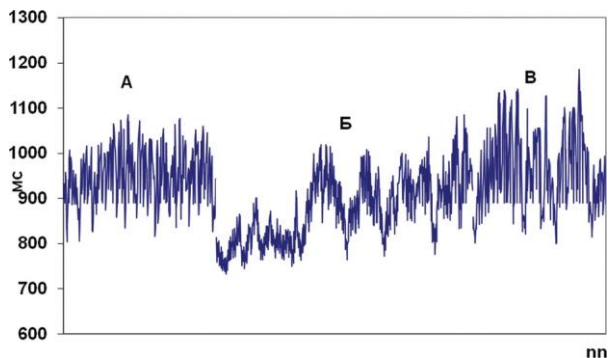


Рис. 3. Нативний запис R-R інтервалів обстежуваного №71

Примітки: А – спокій; Б – гіпервентиляція з частотою 30 циклів за хвилину; В – 35-40 хвилина відновлення.

Аналіз оригінальних записів послідовних R-R інтервалів свідчить про широкую різноманітність реакцій серцевого ритму при гіпокапнії та після неї між окремими особами. Подібних прикладів ритмограм можна навести велику кількість. Очевидно, що для кожної людини структура серцевого ритму в спокої сидячи достатньо індивідуальна та відображає особливості співвідношення регулюючих впливів в організмі. Оскільки норма коливань тривалості R-R-інтервалу вельми широка, можна припустити існування типологічних груп серед здорових молодих людей за цими характеристиками.

Зміни статистичних та спектральних показників ВСП при регламентованому диханні з частотою 30 циклів за хвилину у здорових молодих чоловіків.

Проведений аналіз (табл. 1) свідчить про те, що під час регламентованого дихання спостерігаються достовірні зміни усіх досліджуваних показників. Так, при гіпокапнії знижувалась t-R-R інтервалів, SDNN

Таблиця 1 – Показники статистичного аналізу ВСР у спокої, при регламентованому диханні 30 циклів за хвилину та під час відновлення у здорових молодих чоловіків (n=78)

Умови	Показники			
	t-R-R, мс	SDNN, мс	rMSSD, мс	
Спокій	883,8±16,0	76,85±4,49	75,04±7,25	
Проба	5 хв	732,3±13,8***	51,83±3,02***	39,34±3,21***
	10 хв	770,7±15,1***	57,84±4,00***	49,99±5,89**
Відновлення	5 хв	926,5±15,7*	83,68±5,67	85,60±9,14
	10 хв	933,8±15,8*	80,11±4,81	81,13±7,93
	20 хв	959,2±17,0***	86,47±4,84*	92,87±8,20*
	40 хв	922,2±17,2*	91,83±5,54*	91,92±8,66*

Примітки: * - p<0,05; ** - p<0,01; *** - p<0,001 в порівнянні з рівнем у спокої.

та rMSSD, що говорить про збільшення ЧСС, зменшення ВСР та послаблення впливу парасимпатичної ланки вегетативної нервової регуляції під впливом 10-хвилинної гіпервентиляції та зменшенні PetCO₂. На початку відновного періоду суттєвим було тільки збільшення тривалості R-R інтервалів, а 35-40 хвилини відновлення характеризуються вищими від початкових показниками статистичного аналізу ритму серця, що говорить про виражений ефект післядії гіпокапнії, посилення автономного контуру, зокрема парасимпатичної ланки регуляції серцевого ритму, а отже оптимізації регуляції фізіологічних функцій після проби [9, 10].

Аналіз реактивності статистичних показників при пробі та відновленні свідчить про значний їх розкид у вибірці.

Загалом, під час проби (**табл. 2**) реакція спектральних показників була односпрямованою: спостерігалася тенденція до зниження рівня усіх параметрів. Хоча зміни VLF-компоненту спектру були

Таблиця 2 - Показники хвильової структури серцевого ритму у спокої, під час регламентованого дихання з частотою 30 циклів за хвилину та наприкінці відновного періоду

Показники	Умови			
	Спокій	Проба 5 хв	Проба 10 хв	Відновлення
VLF, мс ²	1150 [742; 2550]	1116 [635; 2294]	1207 [731; 2141]	2196** [1095; 3489]
LF, мс ²	1232 [641; 2566]	340*** [171; 690]	485** [245; 767]	1265** [832; 3107]
HF, мс ²	1207 [631; 3133]	114*** [43; 273]	143*** [68; 447]	1359* [544; 5248]
tLF, Гц	0,095 [0,074; 0,122]	0,070*** [0,053; 0,091]	0,071*** [0,058; 0,090]	0,077** [0,062; 0,098]
HFnorm, %	51,90 [37,16; 62,56]	25,22*** [15,57; 34,66]	27,98*** [18,27; 39,77]	45,21 [34,25; 64,79]
TP, мс ²	3743 [2338; 8790]	1768*** [1058; 3478]	1805*** [1183; 3656]	5712*** [2892; 14808]

Примітки: * - p<0,05; ** - p<0,01; *** - p<0,001 в порівнянні з рівнем у спокої.

недостовірні. Наприкінці відновлення реєстрували вірогідно вищі значення VLF, LF, HF та TP. Однак рівень tLF не відновився навіть до 40 хвилини після гіпервентиляції.

Отримані результати збігаються з літературними даними [11] та показують збільшення потужності як LF, так і HF-компонентів спектру серцевого ритму. Разом зі зміною потужності окремих компонентів спектру ВСР після регламентованого дихання збільшується загальна його потужність. Цілком можливо, збільшення TP після проби у досліджуваних чоловіків пов'язане з активацією вегетативного і зменшення впливу центрального контуру регуляції, що спричинює збільшення адаптаційного потенціалу організму.

Для спектральних показників ВСР також відмічений значний розкид реакцій на пробу та у період відновлення після неї, що може свідчити про наявність типологічних особливостей змін ВСР у здорових молодих чоловіків на гіпокапнію.

Зміни статистичних та спектральних показників ВСР при регламентованому диханні з частотою 30 циклів за хвилину у молодих чоловіків з різним вихідним рівнем PetCO₂.

Відомо, що індивідуальні показники рівня PetCO₂ в спокої можуть бути обумовлені як генетичними особливостями людини, так і впливом середовища. Раніше нами показано, що у досліджуваній групі здорових молодих чоловіків розподіл PetCO₂ в стані спокою був нормальним, тому методом сигмальних відхилень ($\pm 0,5\sigma$) виділили три групи: перша – склала 24 особи, які мали вихідний рівень PetCO₂ до 38,5 мм рт.ст., у II групу ввійшли 27 осіб з фоновим рівнем PetCO₂ 38,5-41,74 мм рт.ст. та III група включала 27 осіб з рівнем PetCO₂ у спокої більше 41,74 мм рт.ст. [8].

Вельми цікавим було проаналізувати динаміку статистичних показників у осіб з різним вихідним рівнем PetCO₂ за умов гіпервентиляції. Так, ще у спокої існують відмінності SDNN та rMSSD у представників різних типологічних груп. А саме, SDNN у чоловіків II та III групи (85,73±9,54 та 81,15±7,32 мс відповідно) було вищим ніж у I (64,26±5,75 мс). В осіб із середній та високим рівнем PetCO₂ rMSSD (**рис. 4**) склав 92,89±16,14 мс та 80,61±11,46 мс, що є вірогідно вищим ніж у чоловіків з низьким його рівнем (55,60±7,43 мс). Отримані результати схожі з даними літератури. За дослідженнями [12], люди з низьким вихідним рівнем PetCO₂

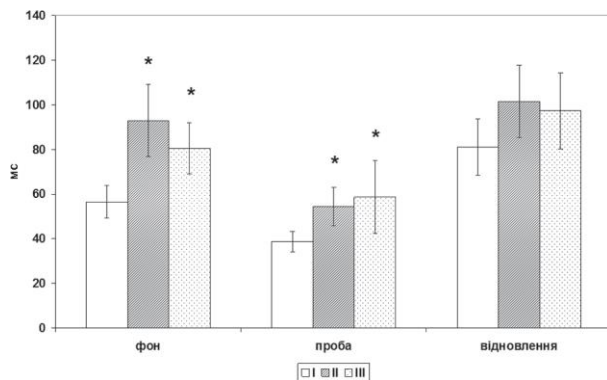


Рис. 4. Рівні rMSSD у спокої, при регламентованому диханні 30 циклів за хвилину та на 35-40 хвилині відновлення у здорових молодих чоловіків з різним вихідним рівнем PetCO₂

Примітка: * - p<0,05 у порівнянні з I.

мають достовірно вищий рівень особистісної трижовності, а, відповідно, і більшу активацію симпатичної нервової системи.

Такі відмінності зберігаються і при регламентованому диханні з частотою 30 циклів за хвилину. Так, SDNN у осіб II і III групи становив 63,93±6,89 мс та 63,63±9,60 мс і був вищим, ніж у I групі (46,90±3,70 мс). Подібна тенденція спостерігається при аналізі rMSSD: у чоловіків II та III групи (54,43±8,66 і 58,74±16,20 мс) цей показник був достовірно більшим ніж у I-ї (38,76±4,55 мс). Можливо, це свідчить про більш високі функціональні можливості чоловіків із середнім та високим вихідним рівнем PetCO₂ та переважання у них потужності енергетичного спектру парасимпатичної ланки вегетативної нервової регуляції, що зберігається при гіпокапнії.

Під час відновлення різниця досліджуваних статистичних показників BCP між групами з різним вихідним рівнем PetCO₂ нівелювалась.

Такі закономірності підтверджуються та пояснюються роботами інших авторів. За літературними даними у гіпокапнічних осіб спостерігається певна ступінь напруження регуляторних систем, тому для адаптації до умов оточуючого середовища організму потрібні додаткові функціональні резерви. Показник активності регуляторних систем та низький рівень rMSSD свідчить про донозологічний стан таких людей, що підтверджується наявністю хронічних захворювань у 93,2% [13].

Відмічено, що реактивність більшості статистичних показників при пробі та відновленні у чоловіків з різним вихідним рівнем PetCO₂ характеризувалась незначними відмінностями. Вірогідно знижувалося лише rMSSD при гіпокапнії у представників II групи (-38,46±14,11 мс) порівняно з I-ю (-16,84±4,86 мс).

Проведений спектральний аналіз серцевого ритму у фоні, під час регламентованого дихання та відновного періоду свідчить про те, що всі значення мали односпрямований характер. Між досліджуваними групами достовірних відмінностей не спостерігали. Лише за показником tLF вже у фоні відмічено вірогідну різницю між I (0,075 [0,049; 0,087] Гц) та III (0,103 [0,0875; 0,1255] Гц) групами, а також на 40-й хв відновлення між особами I-ї (0,077 [0,067; 0,101] Гц) та II-ї (0,0785 [0,06325; 0,09475] Гц).

При аналізі реактивності хвильової структури ритму серця виявлено, що найбільша зміна показників під час гіпокапнії спостерігається у представників III групи, хоча достовірні відмінності відзначені тільки за низькочастотним компонентом спектру (-617 [-1537; -335] мс²). Можна побачити, що реактивність частини аналізованих показників на гіпервентиляцію між групами була односпрямованою (LF, HF, tLF, HFnorm), інших (VLF) – суттєво варіювала. Під час відновлення спостерігається більша варіативність реакцій (HF, tLF, HFnorm). Достовірні відмінності реактивності за показниками LF та HF відмічено у чоловіків III групи (234 [-700; 808] мс² і -156 [-700; 3647] мс² відповідно) порівняно з I (363 [10; 1184] мс² та -570 [-1821; -317] мс²), а зміни HFnorm були вірогідно вищими у осіб з середнім вихідним рівнем PetCO₂ (-3,88 [-9,51; 4,06] %) порівняно з досліджуваними із низьким його рівнем (-0,47 [-7,81; 11,40] %).

За літературними даними показники активності автономного контуру регуляції серцевого ритму у гіпокапнічних людей нижче, а центрального – вище норми. Відповідно, у досліджуваних з гіпокапнічним типом вентиляції центральний контур вносить більший вклад в регуляцію серцевого ритму, ніж при нормакапнічному типі, активність автономного контуру пригнічується, регуляторні системи організму знаходяться в більшому напруженні, що підтверджується нашими даними [14, 15]. За результати дослідження Двоєнсова В.Г. зі співавторами 2-хвилинна гіпервентиляція призводить до підвищення активності симпатичного відділу вегетативної нервової системи, зниження ефективності легеневої вентиляції, газообміну і напруження механізмів регуляції ритму серця. Цікаво, що студентки з низьким індексом дихання більш стійкі до гіпокапнії, ніж з високим [4].

Зміни статистичних та спектральних показників BCP при регламентованому диханні з частотою 30 циклів за хвилину у здорових молодих чоловіків з різним вихідним рівнем вегетативного тону.

Оскільки з'ясовано, що існують значущі різниці між параметрами варіабельності ритму серця у осіб з різним вихідним рівнем PetCO₂, виникає

питання, чи спостерігаються такі зміни у групах з різним рівнем вегетативного тону. Так як за 5-хвилинними записами кардіоінтервалограми в спокої та при експериментальних впливах оцінювали показник нормалізованої потужності спектру в діапазоні 0,15 – 0,4 Гц (HF_{norm}), який відображає рівень вагосимпатичного балансу [16]. За розподілом цього показника у спокої методом сигнальних відхилень виділили три групи осіб: симпатотоніки (I, n=22) до 40 у.о., нормотоніки (II, n=30) від 40 до 60 у.о. та парасимпатотоніки (III, n=25) від 60 у.о.

Вже у стані спокою між особами цих груп знайдені вірогідні відмінності параметрів SDNN та rMSSD. З табл. 3 видно, що більші значення досліджуваних показників спостерігаються в парасимпатотоніків. При пробі чоловіки III групи мають вищі показники SDNN та, відповідно, менше напруження регуляторних систем, ніж особи I та II груп. Схожі розбіжності відмічені за rMSSD, що збільшується зі зростанням рівня вегетативного тону у групах. Подібні відмінності даних показників відмічені і під час періоду відновлення. Це свідчить про більшу потужність енергетичного спектру парасимпатичної ланки вегетативної нервової регуляції у парасимпатотоніків, як у спокої, так і при гіпокапнії та протягом 40-ка хв після неї.

Відмічено, що реактивність статистичних показників BCP при пробі та відновленні також характеризувалась індивідуальними особливостями. Так, у осіб I групи їх змін від фону не спостерігалось. Однак чоловіки II та III групи характеризувались зниженням rMSSD при гіпокапнії (на 18,59±5,88 та 50,64±17,54 мс (p<0,05), відповідно). З рис. 5 видно, що найбільша реактивність за цим показником при гіпокапнії властива саме парасимпатотонікам.

Відмічено значущі різниці між параметрами хвильової структури BCP у осіб з різним вихідним рівнем вегетативного тону. Так, у стані спокою HF був вищим у нормотоніків (997 [618; 1984] мс²) порівняно із симпатотоніками (621 [276; 1059] мс²),

Таблиця 3 – Статистичні показники BCP у спокої, під час регламентованого дихання з частотою 30 циклів за хвилину та в період відновлення у здорових молодих чоловіків з різним вихідним рівнем вегетативного тону (n=78)

Умови	Показники	Групи		
		I	II	III
Спокій	SDNN, мс	63,12±6,66	71,29±6,67*	95,72±9,09**
	rMSSD, мс	41,00±5,88	64,34±8,10*	120,28±16,43**
Проба	SDNN, мс	47,27±4,38	55,24±4,68	70,41±10,08**
	rMSSD, мс	33,63±4,71	45,75±5,78*	69,64±15,88**
Відновлення	SDNN, мс	74,49±8,42	88,31±9,01	112,64±10,06**
	rMSSD, мс	53,74±8,77	83,81±11,61*	136,08±18,51**

Примітки: * - p<0,05 у порівнянні з I групою; # - p<0,05 у порівнянні II з III.

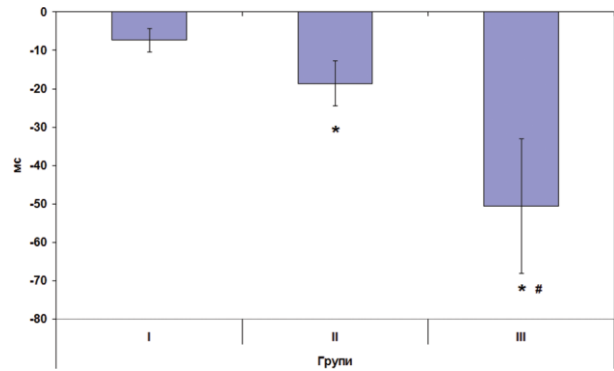


Рис. 5. Реактивність rMSSD при регламентованому диханні з частотою 30 циклів за хвилину у групах з різним вихідним рівнем вегетативного тону

Примітки: * - p<0,05 у порівнянні з I групою; # - p<0,05 у порівнянні з II групою.

в той час як ваготоніки мали найвищий рівень високочастотного діапазону (3493 [1665; 7419] мс²), що є логічним та свідчить про переваження парасимпатичної ланки вегетативної нервової системи у цих осіб. Також чоловіки III групи характеризувались найвищими достовірними відмінностями показників tLF (0,112 [0,078; 0,136] мс²), HF_{norm} (71,26 [62,84; 78,51] %) та TPower (7891 [3558; 12762] мс²) порівняно з іншими групами. При гіпокапнії чіткі відмінності між II та III групами нівелюються. Так, під час регламентованого дихання у осіб II групи спостерігали вірогідну різницю показників HF_{norm} (30,64 [20,13; 39,45] %), а чоловіки III – мали достовірно вищі значення як HF_{norm} (30,86 [21,48; 53] %), так і HF (207 [108; 672] мс²) порівняно з I групою. Через 35-40 хвилин після проби спостерігається тенденція до відновлення відмінностей між нормотоніками та ваготоніками. При цьому досліджувані III групи мали найвищі значення параметрів LF (2308 [1040; 3820] мс²), HF (5078 [1269; 10161] мс²), tLF (0,092 [0,068; 0,104] Гц), HF_{norm} (69,86 [45,17; 72,78] %) і TPower (12242 [4947; 17675] мс²) проти інших груп. Також відмічено більші значення HF (1140 [534; 3899] мс²) та HF_{norm} (45,47 [36,16; 63,29] %) у II групі порівняно з I (623 [326; 1627] мс² й 34,01 [25,09; 43,52] % відповідно). Загалом, можна зробити висновок, що знижена концентрація CO₂ в організмі внаслідок 10-хвилинної гіпервентиляції призводить до зменшення відмінностей хвильової структури ритму серця між групами з різним вихідним рівнем вегетативного тону.

Під час гіпервентиляції спостерігали значну реактивність хвильової структури ритму серця. Так, у чоловіків III

групи, порівняно з іншими, визначено зниження HF на 2609 мс², tLF на 0,029 Гц та HF_{norm} на 35,16 %. Разом з тим в осіб II групи відзначено зменшення лише HF на 674 мс² та HF_{norm} на 20,13% порівняно з I групою. Тобто ваготоніки характеризуються найбільшою варіативністю реакцій під час гіпокапнії. Наприкінці відновного періоду тільки досліджувані III групи за показниками LF (741 мс²) та HF_{norm} (-4,33%) мали достовірні відмінності реактивності порівняно з іншими групами.

Висновки

1. Візуальний аналіз записів ритмограм свідчить про наявність індивідуальних особливостей хвильової структури серцевого ритму у молодих чоловіків як у спокої, так і при гіпокапнії дихання та відновленні після неї.
2. При гіпервентиляції тривалість R-R інтервалів, рівень SDNN, rMSSD та показники потужності їх спектру вірогідно знижуються. Наприкінці відновлення спостерігаються достовірно вищі їх значення у порівнянні з фоном. Однак частота максимуму спектру у діапазоні низьких частот не

відновлюється до 40 хвилини після гіпервентиляції.

3. У осіб з різним вихідним рівнем PetCO₂ як у стані спокою, так і при гіпокапнії відмічено вищі значення варіативності серцевого ритму у осіб з високим та середнім його рівнем у порівнянні із чоловіками з низьким його рівнем. Для хвильової структури серцевого ритму такі різниці наявні тільки за частотою максимуму спектру у діапазоні низьких частот.
4. Існують відмінності у змінах варіативності серцевого ритму та її хвильової структури при гіпокапнії дихання, у період відновлення після неї в залежності від вихідного рівня вегетативного тону-су.

Перспективи подальших досліджень. Представлені результати дослідження являються початковою ланкою вивчення впливу різної концентрації CO₂ на функціональний стан серцево-судинної системи. В подальшому актуальним є вивчення індивідуальних особливостей впливу гіпокапнії на церебральну гемодинаміку.

References

1. Bisconti AV, Devoto M, Venturelli M, Bryner R, Olfert IM, Chantler PD, et al. Respiratory muscle training positively affects vasomotor response in young healthy women. *PLoS One*. 2018; 13(9): e0203347. doi: 10.1371/journal.pone.0203347
2. Li C, Chang Q, Zhang J, Chai W. Effects of slow breathing rate on heart rate variability and arterial baroreflex sensitivity in essential hypertension. *Medicine (Baltimore)*. 2018; 97(18): e0639. doi: 10.1097/MD.00000000000010639
3. Hinterberger T, Walter N, Doliwa C, Loew T. The brain's resonance with breathing-decelerated breathing synchronizes heart rate and slow cortical potentials. *J Breath Res*. 2019; 13(4): 046003. doi: 10.1088/1752-7163/ab20b2
4. Dvoenosov VG, Yusupov RA, Torshin VI, Starshinov YuP, Radysh IV. Fiziologicheskie osobennosti reaktsii kardiorespiratornoy sistemy u studentok s razlichnym urovnem legochnoy ventilyatsii v usloviyakh giperventilyatsii [Physiological characteristics of the reaction of the cardiorespiratory system in students with different levels of pulmonary ventilation under hyperventilation]. *Tekhnologii zhivyykh sistem*. 2014; 11(5): 47-52. [Russian]
5. Nekrasova MM. Izmeneniya entsefalograficheskikh parametrov i spektralnykh pokazateley variabelnosti serdechnogo ritma pri provedenii funktsionalnykh prob u voditeley so stazhem [Changes in encephalographic parameters and spectral indicators of heart rate variability during functional tests for experienced drivers]. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya*. 2016; 7(280): 28-30. [Russian]
6. Trubachev VV, Trubacheva VS. Variabelnost serdechnogo ritma pri navyazannom dykhanii u sportsmenov [Heart rate variability in forced breathing in athletes]. *Dnevnik kazanskoy meditsinskoy shkoly*. 2019; 1: 82-5. [Russian]
7. Kovalenko SO. Kharakteristika ta teoretichni osnovi metodiv analizu variabelnosti sertsevogo ritmu [Characteristics and Theoretical Foundations of Methods to Analyze Heart Rate Variability]. *Ukrayinskiy zhurnal meditsini, biologiyi ta sportu*. 2017; 2: 223-33. [Ukrainian] <https://doi.org/10.26693/jms02.02.223>
8. Zavgorodnya VA, Kovalenko SO, Kudiy LI. Vpliv giperventilyatsiyi na dinamiku rivnya karbon (IV) oksidu v alveolyarnomu povitri [Influence of hyperventilation on the dynamics of carbon (IV) oxide level in alveolar air]. *Visnik Cherkaskogo universitetu. Seriya: Biologichni nauki*. 2018; 2: 34-9. [Ukrainian]
9. Chuyan EN, Mironyuk IS, Biryukova EA. Upravlyaemoe dykhanie s individualno podobranoy chastotoy izmenyaet vremennuyu organizatsiyu serdechnogo ritma v infradiannom diapazone [Controlled breathing with an individually selected frequency changes the temporal organization of the heart rhythm in the infradian range]. *Uchenye zapiski Krymskogo federalnogo universiteta imeni VI Vernadskogo. Biologiya. Khimiya*. 2018; 4(1): 148-57. [Russian]
10. Kudiy LI, Ribalko AV, Zaporozhets TV. Khvilova struktura pokaznikiv gemodinamiki pri riznomu vikhidnomu rivni chas-toti dikhannya u cholovikiv [Wave structure of hemodynamic indices at different baseline respiratory rate in men]. *Visnik Cherkaskogo universitetu. Seriya: Biologichni nauki*. 2018; 1: 54-61. [Ukrainian]
11. Chuyan EN, Mironyuk IS, Biryukova EA, Zayachnikova TV, Ravaeva MYu. Upravlenie dykhaniem modifitsiruet svyaz variabelnosti serdechnogo ritma volonterov s variatsiyami geliogeomagnitnykh faktorov [Respiratory management modifies the relationship of the heart rate variability of volunteers with variations of heliogeomagnetic factors]. *Fizioterapiya, balneologiya i reabilitatsiya*. 2015; 14(6): 35-41. [Russian]

12. Soloveva AV, Byalovskiy YuYu, Rakita DR. Sostoyanie legochnogo gazoobmena pri metabolicheskom syndrome [The state of pulmonary gas exchange in metabolic syndrome]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta*. 2015; 1(53): 104-7. [Russian]
13. Guzii OV. Izmeneniya reaktivnosti pokazateley serdechnogo ritma na upravlyaemoe dykhanie pri trenirovkakh obshchey vynoslivosti [Changes in the reactivity of heart rate indicators to controlled breathing during general endurance training]. *Zaporozhskiy meditsinskiy zhurnal*. 2018; 1: 36-40. [Russian] doi: 10.14739/2310-1210.2018.1.121882
14. Dimitriev DA, Saperova EV, Dimitriev AD, Indeykina OS. Vliyanie dykhaniya na chastote rezonansa na nelineynye dinamiki variabelnosti serdechnogo ritma [The effect of respiration at the resonance frequency on the nonlinear dynamics of heart rate variability]. *Fiziologiya cheloveka*. 2019; 1(45): 64-72. [Russian]
15. Trubachev VV, Gorbunov AV, Trubacheva VS, Nemtseva MS, Ogorodnikova MS. Analiz respiratorno-serdechnogo vzaimodeystviya u sportsmenov i nesportsmenov pri navyazannoy chastote dykhaniya [Analysis of respiratory-cardiac interaction in athletes and non-athletes with an imposed respiratory rate]. *Rossiyskiy fiziologicheskiy zhurnal im IM Sechenova*. 2015; 101(2): 238-48. [Russian]
16. Malik M, Hnatkova K, Huikuri HV, Lombardi F, Schmidt G, Zabel M. CrossTalk proposal: heart rate variability is a valid measure of cardiac autonomic responsiveness. *J Physiol*. 2019; 597(10): 2595-8. doi: 10.1113/JP277500

УДК 612.172.2

АНАЛИЗ ВАРИАбельНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА ПРИ ГИПОКАПНИИ ДЫХАНИЯ У МОЛОДЫХ МУЖЧИН

Завгородняя В. А., Витько С. М., Кудий Л. И., Коваленко С. А.

Резюме. Оценка показателей вариабельности сердечного ритма составляет научную основу в прогнозировании возможностей и контроля функционального состояния человека. Установлено, что различные паттерны дыхания существенно влияют на структуру ритма сердца. Поэтому целью исследования является изучение индивидуальных особенностей вариабельности сердечного ритма при дыхании с частотой 30 циклов в минуту у здоровых молодых мужчин. Было проведено регистрацию записей капнограммы дыхания на капнографе DATEX NORMOCAP (Datex, Finland) и кардиоинтервалограмм с помощью кардиодатчика Polar W.I.N.D. Link приемником Polar Wearlink W.I.N.D у программе Polar Protrainer 5.0 (Polar ElectroOY, Finland) у 78 здоровых молодых мужчин. Анализ записей ритмограмм свидетельствует о наличии индивидуальных особенностей сердечного ритма и его изменений при гипервентиляционной пробе.

При гипервентиляции продолжительность R-R интервалов, уровень SDNN, rMSSD и показатели мощности их спектра снижаются. На 40-й минуте восстановления наблюдаются увеличение их уровня от фона. Однако уровень максимального пика в спектре низких частот сердечного ритма (tLF) после гипервентиляции не восстанавливается.

У лиц с разным исходным уровнем PetCO₂ как в состоянии покоя, так и при гипокании отмечено выше значение SDNN и rMSSD у представителей со средним и высоким его уровнем. Во время восстановления разница исследуемых статистических показателей между группами нивелируется. При анализе волновой структуры сердечного ритма в фоне наблюдается достоверная разница tLF между мужчинами с низким и высоким уровнем PetCO₂, а также в конце восстановления между лицами с низким его уровнем и средним.

Среди мужчин с разным исходным уровнем вегетативного тонуса в состоянии покоя, во время гипервентиляции и в период восстановления наибольшие значения исследуемых показателей наблюдаются в парасимпатотоников. При гипокании четкие различия между группами нормотоников и ваготоников нивелируются за исключением следующих показателей: у нормотоников наблюдали достоверную разницу показателей HF_{norm}, а ваготоники – имели более высокие значения как HF_{norm} так и HF по сравнению с симпатотониками.

Итак, изменения статистических показателей сердечного ритма и его спектральных компонентов при гипокании дыхания имеют существенные индивидуальные различия. Одним из факторов, обуславливающих их может быть исходный уровень PetCO₂ и вегетативного тонуса.

Ключевые слова: вариабельность сердечного ритма, вегетативный тонус, PetCO₂, гипервентиляция, гипокания.

UDC 612.172.2

Analysis of Heart Rate Variability in Young Men with Hypocapnia Breathing

Zavhorodnia V. A., Vitko S. M., Kudiy L. I, Kovalenko S. O.

Abstract. Assessment of heart rate variability is a scientific basis for predicting physical ability and controlling a person's functional state. Different respiratory structures have been found to affect heart rate variability.

Therefore, *the purpose of the research* was to study the individual features of heart rate variability with breathing at a rate of 30 cycles per minute in healthy young men.

Material and methods. Breathing capnogram was recorded on DATEX NORMOCAP (Datex, Finland) capnography; cardio intervals were recorded by Polar W.I.N.D. Link cardio sensor, Polar Wearlink W.I.N.D receiver in Polar Protrainer 5.0 (Polar ElectroOY, Finland) program in 78 healthy young men. The analysis of the native records of rhythmograms indicates the individual features of heart rate regulation in young men.

Results and discussion. The level of SDNN, rMSSD and the indicators of spectral analysis with hyperventilation of t-R-R intervals reliably decrease. Reliably higher values of statistical and spectral analysis of heart rate variability than initial ones were observed at the end of recovery. However, tLF frequency was not restored after hyperventilation.

Higher values of SDNN and rMSSD were found in the subjects with medium and high levels of PetCO₂ both at rest and with hypocapnia. During the recovery, the difference between the studied statistical indicators was leveled between the groups. Reliable difference of tLF was observed with the analysis of the wave structure of heart rate in the background between men with low and high levels of PetCO₂ and at the end of recovery between people with low and medium levels of PetCO₂.

The highest values of the studied indicators were observed in parasympathotonics among the men with different level of autonomic tonus at rest, with hyperventilation and recovery. Distinct differences between normotonics and vagotonics were leveled with hypocapnia; reliable difference of HF_{norm} indicators was observed in the subjects of normotonics; reliably higher values of both HF_{norm} and HF were observed in vagotonics compared to sympathotonics.

Conclusion. Therefore, changes in the statistical indicators of cardiac rhythm and its spectral components in hypocapnia breathing have significant individual differences. One of the factors that determine them may be the initial level of PetCO₂ and autonomic tone.

Keywords: heart rate variability, autonomic tone, PetCO₂, hyperventilation, hypocapnia.

The authors of this study confirm that the research and publication of the results were not associated with any conflicts regarding commercial or financial relations, relations with organizations and/or individuals who may have been related to the study, and interrelations of coauthors of the article.

Стаття надійшла 10.01.2020 р.

Рекомендована до друку на засіданні редакційної колегії після рецензування