



UNIwersYTET
MEDYCZNY
W ŁODZI

Wydział Lekarski

kpt. lek. Artur Szewczyk

**ADAPTACJA ORGANIZMU MŁODYCH MĘŻCZYZN
DO RÓŻNEGO RODZAJU WYSIŁKU FIZYCZNEGO,
W ODNIESIENIU DO WYBRANYCH WSKAŹNIKÓW
WYTRENOWANIA**

**Adaptation to various kinds of physical exercise in young males
in relation to selected athletic performance indicators**

Rozprawa doktorska napisana pod kierunkiem
prof. dr hab. n. med. Anny Jegier
w Zakładzie Medycyny Sportowej
Uniwersytetu Medycznego w Łodzi

Łódź, 2022r.

1. Streszczenie / Abstract

1.1 Streszczenie

Adaptacja organizmu młodych mężczyzn do różnego rodzaju wysiłku fizycznego, w odniesieniu do wybranych wskaźników wytrenowania.

Wprowadzenie i cel badania

Wskaźniki wytrenowania sportowca są odzwierciedleniem adaptacji organizmu do regularnego wysiłku fizycznego. Do tej pory zidentyfikowano wiele wskaźników wytrenowania jak m. in.: wielkość wydolności fizycznej tlenowej i beztlenowej, pomiary antropometryczne składu ciała, wskaźniki charakteryzujące budowę i czynność mięśnia sercowego, wskaźniki biochemiczne. Wraz z rozwojem wiedzy medycznej charakteryzowane są kolejne wskaźniki o potencjalnym zastosowaniu w ocenie wytrenowania sportowca. Dzięki zwiększonej dostępności do zaawansowanych metod badawczych, w tym analiz epigenetycznych, możliwe staje się poznanie zależności pomiędzy ekspresją cząsteczek microRNA, a stanem wytrenowania organizmu człowieka. Dotychczasowe publikacje przedstawiają wyniki zależności pomiędzy pojedynczymi wskaźnikami wytrenowania, a wielkością ekspresji niektórych klas microRNA i uzyskane były u sportowców trenujących najczęściej jedną dyscyplinę sportową lub w grupie sportowców z przewagą jednego rodzaju wysiłku fizycznego w podstawowym treningu sportowym. W dostępnym piśmiennictwie nie znaleziono informacji, które w szeroki i jednoznaczny sposób określałyby wzajemne zależności pomiędzy wskaźnikami wytrenowania, a ekspresją cząsteczek microRNA w zależności od rodzaju prowadzonego treningu fizycznego.

Celem badań własnych była ocena adaptacji organizmu młodych mężczyzn do różnego rodzaju regularnego wysiłku fizycznego: o dominującym treningu wytrzymałościowym lub dominującym treningu siły mięśniowej, w odniesieniu do wybranych klasycznych wskaźników wytrenowania oraz wskaźników bimolekularnych, uwzględniających ekspresję wybranych klas miRNA. W kolejnym etapie badań poddano ocenie związków między badanymi wskaźnikami wytrenowania, a ekspresją wybranych klas miRNA w grupach mężczyzn o odmiennym charakterze treningu sportowego.

Materiał i metoda

Przebadano 142 klinicznie zdrowych mężczyzn w wieku 18-35 lat. Po uwzględnieniu kryteriów włączenia i wyłączenia do badania, do ostatecznej analizy zakwalifikowano 116 mężczyzn w następujących grupach: sportowcy trenujący wytrzymałościowo (n=48), sportowcy trenujący siłę mięśniową (n=37) oraz mężczyźni z grupy kontrolnej nie podejmujący regularnych wysiłków fizycznych (n=31).

Badanych mężczyzn poddano badaniu lekarskiemu z oceną aktywności fizycznej, pomiarom antropometrycznym z wyliczeniem zawartości podskórnej tkanki tłuszczowej (TSBF%), badaniom biochemicznym i morfologicznym krwi żyłnej wykonanym z uwzględnieniem elementów lipidogramu, stężeń: glukozy, insuliny, insulino-podobnego czynnika wzrostu¹ (IGF-1), kortyzolu, testosteronu całkowitego i wolnego, siarczanu dehydroepiandrosteronu (DHEA-S), kinazy kreatynowej (CK), dehydrogenazy mleczanowej (LDH) oraz oceną ekspresji wybranych klas cząsteczek miRNA. Badania biomolekularne uwzględniały ekspresję cząsteczek microRNA klas: miR-1, miR-27a, miR-29b, miR-133, miR-206 i miR-221. Badania te wykonano w czasie rzeczywistym w reakcji qPCR przy wykorzystaniu sond CustomTaqMan® ArrayMicroRNA Cards. U badanych mężczyzn wykonano również nieinwazyjną ocenę czynności i budowy serca w spoczynku w czasie badania elektrokardiograficznego i badania echokardiograficznego.

Aby ocenić wielkość wydolności fizycznej tlenowej i beztlenowej, u wszystkich mężczyzn przeprowadzono maksymalny test sercowo-płuczny na bieżni mechanicznej wg zmodyfikowanego protokołu Costill-Fox² a oraz test Wingate (Bar-Ora) na cykloergometrze.

Ocenę stanu psycho-emocjonalnego i motywacji do treningu dokonano wykorzystując kwestionariusz oceny profilu nastrojów POMS w celu wykluczenia zespołów przemęczenia niefunkcjonalnego i przetrenowania NFO/OTS.

Zebrane wyniki badań poddano analizie statystycznej przy użyciu programu Statistica v.13, przyjmując za różnice istotne statystycznie $p \leq 0,05$.

Wyniki

Analiza wyników badań własnych wykazała istotne statystyczne różnice dotyczące większości badanych wskaźników wytrenowania oraz ekspresji miRNA pomiędzy badanymi grupami sportowców i grupą kontrolną mężczyzn.

W zakresie pomiarów antropometrycznych, grupa sportowców trenujących wytrzymałościowo wykazała najmniejszą masę ciała oraz najmniejsze, obwody: talii, ramienia, bioder i uda. Największy obwód ramienia charakteryzował grupę trenującą siłę mięśniową. W zakresie procentowej zawartości podskórnej tkanki tłuszczowej obie grupy sportowców uzyskały wartość 14%, co stanowiło istotnie mniejszą wartość w porównaniu do grupy kontrolnej o średniej zawartości wynoszącej 22%.

W oznaczeniach biochemicznych nie odnotowano istotnych różnic pomiędzy grupami sportowców trenujących wytrzymałościowo lub trenujących siłę mięśniową. Mężczyźni z grupy kontrolnej wykazywali w stosunku do obu grup sportowców istotnie większe wartości stężeń: TG, TC, LDL-C oraz niższe wartości HDL-C. Uzyskane wartości stężenia testosteronu całkowitego w grupie kontrolnej były istotnie niższe w porównaniu do grupy sportowców trenującej siłę mięśniową (5,3 vs 6,2 [ng/ml]) i niższe w stosunku do grupy trenującej wytrzymałościowo (5,3 vs 5,6 [ng/ml]).

W obu grupach sportowców wykazano wyższe wartości tlenowej wydolności fizycznej (VO₂ max) w porównaniu do grupy kontrolnej mężczyzn (56 i 54 vs 44 [ml/kg/min]). Sportowców trenujących wytrzymałościowo charakteryzowały wyższe wartości wentylacji minutowej i zdolności pobierania tlenu zmierzone na progu przemian beztlenowych AT w porównaniu do grupy trenującej siłę mięśniową i grupy kontrolnej.

W przypadku wydolności fizycznej beztlenowej, najlepsze wyniki uzyskała grupa trenująca siłę mięśniową. W porównaniu do grupy trenującej wytrzymałościowo, uzyskała ona istotnie wyższe wartości mocy średniej (620 vs 480 [W]) i mocy średniej utrzymania (747 vs 616 [W]). Grupa kontrolna nie wykazała istotnych statystycznie różnic w stosunku do obu badanych grup sportowców w ocenie wskaźników wydolności fizycznej beztlenowej, a ich pomiar przyjmował wartości pomiędzy najwyższymi wartościami uzyskanymi w grupie trenującej siłę mięśniową, a najniższymi odnotowanymi w grupie trenującej wytrzymałościowo.

Sportowców trenujących wytrzymałościowo charakteryzowały niższe wartości spoczynkowej częstotliwości akcji serca w porównaniu do grupy trenującej siłę mięśniową i grupy kontrolnej (60 vs 67 vs 69 [n/min], $p < 0,05$).

Wyniki pomiarów echokardiograficznych serca wykazały zbliżone wartości w badanych grupach mężczyzn, spośród których tylko kilka wskaźników wykazało istotne statystycznie różnice. Grupa trenująca siłę mięśniową wykazała- w stosunku do grupy trenującej wytrzymałościowo- istotnie większe wartości objętości końcoworozkurczowej (141 vs 126 [ml]) i objętości wyrzutowej lewej komory serca (101 vs 94 [ml]) W grupie trenującej siłę mięśniową wartość EF była najwyższa w porównaniu do grupy trenującej wytrzymałościowo i grupy kontrolnej (71 vs 70 vs 67 [%]).

Ocena ekspresji miRNA w spoczynku wykazała istotne różnice w ekspresji klas: miR-29b, miR-133 i miR-221 pomiędzy obiema grupami sportowców oraz grupą kontrolną mężczyzn. Regularny wysiłek fizyczny, niezależnie od jego charakteru, cechowały wyższe wartości spoczynkowej ekspresji miRNA klas: miR-29b i miR-221 oraz niższe wartości ekspresji miR-133 w porównaniu do grupy kontrolnej mężczyzn.

Ekspresja miR-1 była zmienna w zależności od charakteru regularnego treningu fizycznego. Trening wytrzymałościowy charakteryzowała większa ekspresja miR-1, podczas gdy trening siły mięśniowej - mniejsze wartości ekspresji miR-1. Regularną aktywność fizyczną

cechowały mniejsze wartości ekspresji miR-133 niezależnie od rodzaju trenowanej dyscypliny sportowej. Najwyższe wartości ekspresji miR-27a obserwowano w grupie trenującej wytrzymałościowo. Sportowców uczestniczących w treningu wytrzymałościowym charakteryzowały w spoczynku wysokie wartości ekspresji microRNA klas: miR-1, miR-27a, miR-29b, miR-221 oraz niskie wartości ekspresji miR-133 w porównaniu do grupy kontrolnej mężczyzn. Młodych mężczyzn trenujących siłę mięśniową charakteryzowały wysokie wartości ekspresji microRNA klas: miR-29b i miR-221 oraz niskie wartości ekspresji miR-1, miR-27a oraz miR-133 w porównaniu z grupą trenującą wytrzymałościowo i grupą kontrolną mężczyzn.

Odnotowano szereg istotnych statystycznie zależności pomiędzy wskaźnikami wytrenowania, a wielkością ekspresji wybranych klas miRNA. Najsilniejsze zależności odnotowano pomiędzy ekspresją mięśniowo-specyficznych klasy miR-1 i miR-133, a wskaźnikami: antropometrycznymi, biochemicznymi, echokardiograficznymi i wskaźnikami wydolności fizycznej tlenowej i beztlenowej. Obserwowano, iż niższe wartości ekspresji miR-1 i miR-133 w grupie trenującej siłę mięśniową, uzyskiwane były przy wyższych wartościach pomiaru obwodu mięśni- w porównaniu do grupy trenującej wytrzymałościowo- oraz przy nieznacznie wyższych wartościach pomiaru grubości fałdów tłuszczowych i zawartości TSBF%.

Obserwacje o przeciwnym kierunku zmian uzyskano w grupie trenującej wytrzymałościowo. Wysokie wartości ekspresji miR-1 i miR-133 występowały przy mniejszych wartościach pomiaru obwodów mięśni i przy nieznacznie mniejszej grubości fałdów tłuszczowych i zawartości TSBF% w tej grupie sportowców.

W badanych grupach mężczyzn podejmujących regularny wysiłek fizyczny wykazano wysoką dodatnią korelację pomiędzy sercowo specyficznymi klasami miRNA: miR-27a i miR-29b, a badanymi wskaźnikami wydolności fizycznej tlenowej: VO_2max , dVO_2/dWR , VE/VCO_2slope i beztlenowej: T_{ppm} , $DR\%P_p$, $DR\%P_{ppm}$ oraz uzyskanymi w badaniu echokardiograficznym wymiarami serca: LVIDd, IVSd, LVPWd, LVPWs i RWT. W obu grupach sportowców zależności te były podobne.

W zakresie biochemicznych i morfologicznych wskaźników wytrenowania oznaczanych w surowicy krwi żyłnej, najbardziej istotna dodatnia zależność dotyczyła stężenia IGF-1 i LDH oraz ekspresji miR-1 w grupie trenującej siłę mięśniową oraz dodatniej korelacji pomiędzy stężeniami testosteronu wolnego i całkowitego, a ekspresją miRNA klas: -1, -27a, -29b, -133, -221 we wszystkich badanych grupach mężczyzn. Wysoka ekspresja miR-1 związana była z mniejszym efektem hipertrofii mięśni szkieletowych w grupie trenującej siłę mięśniową, oraz wyższymi wartościami pomiarów wentylacji minutowej podczas intensywnych wysiłków fizycznych o dominującym tlenowym charakterze przemian energetycznych w grupie trenującej wytrzymałościowo. Wykazano, że wysokie wartości stężenia IGF-1 korelowały dodatnio z niską wartością ekspresji miR-1, co obserwowano w grupie trenującej siłę mięśniową.

Wysoka wartość ekspresji miR-27a wiązała się z wyższymi wartościami tlenowej wydolności fizycznej. Korelacje pomiędzy ekspresją miR-27a, a wskaźnikami tlenowej wydolności fizycznej były zbliżone w grupie kontrolnej i w obu badanych grupach sportowców. Istotne z punktu widzenia adaptacji organizmu do treningu sportowego okazały się dodatnie zależności pomiędzy wartością ekspresji miR-29b i stężeniem testosteronu całkowitego i wolnego w grupie mężczyzn trenujących siłę mięśniową oraz dodatnie zależności ekspresji miR-29b i zawartości TSBF% w obu grupach sportowców.

Najniższa wartość ekspresji miR-133 w grupie trenującej siłę mięśniową odzwierciedlała wysoki stopień adaptacji do wykonywania intensywnych wysiłków fizycznych, co wyrażały najlepiej zaznaczone w tej grupie badanych, pomiary wskaźników echokardiograficznych jam serca typowych dla powysiłkowych zmian adaptacyjnych. Szczególnie dotyczyło to względnej grubości ścian lewej komory serca, jej wymiarów oraz objętości wyrzutowej serca. Obie grupy sportowców w porównaniu do grupy kontrolnej wykazywały morfologiczne i czynnościowe cechy adaptacji serca do wysiłku fizycznego, które były tym większe im mniejsza była wartość ekspresji miR-133 w badanej grupie.

Analiza korelacji ekspresji miR-206 z badanymi wskaźnikami wytrenowania nie wykazała istotności w ocenie adaptacji do wysiłku fizycznego bez względu na rodzaj wykonywanego treningu sportowego.

Wysoka ekspresja cząsteczek miR-221 u sportowców związana była z wyższą wydolnością tlenową organizmu niezależnie od rodzaju trenowanej dyscypliny sportowej.

Podsumowanie wyników i wnioski

1. Adaptacja organizmu młodych mężczyzn do treningu fizycznego zależy od rodzaju wysiłku fizycznego dominującego w treningu.
2. Trening wytrzymałościowy oraz trening siły mięśniowej prowadzą do powstania zmian adaptacyjnych w organizmie sportowca o różnym charakterze w zakresie takich wskaźników wytrenowania jak: wskaźniki antropometryczne (skład ciała), wskaźniki biochemiczne, wskaźniki charakteryzujące budowę i czynność serca, wielkość wydolności fizycznej: tlenowej i beztlenowej. Wykazano, że wskaźniki biomolekularne, uwzględniające ekspresję wybranych klas miRNA mogą istotnie wzbogacić i poszerzyć tę charakterystykę.
3. Badanych sportowców, w zależności od rodzaju treningu fizycznego, charakteryzowały następujące cechy adaptacji do wysiłku fizycznego:
 - W zakresie składu ciała, mężczyzn trenujących siłę mięśniową charakteryzowały większe obwody talii, bioder, ramion i ud w porównaniu z osobami trenującymi wytrzymałościowo; Procentowa zawartość tkanki tłuszczowej w obu grupach sportowców była mniejsza w odniesieniu do grupy kontrolnej;
 - We wskaźnikach biochemicznych nie wykazano zmian istotnych statystycznie w zależności od rodzaju treningu fizycznego. Obserwowano jedynie trend wyższych stężeń kinazy kreatynowej, wolnego testosteronu, kortyzolu i IGF-1 wśród sportowców uczestniczących w treningu siły mięśniowej w porównaniu z pozostałymi mężczyznami;
 - Zmiany w układzie sercowo-naczyniowym charakteryzowała wolniejsza spoczynkowa częstotliwość pracy serca w obu grupach sportowców. W grupie mężczyzn trenujących siłę mięśniową wykazano istotnie większą objętość końcowo-rozkurczową lewej komory serca oraz istotnie większą objętość wyrzutową lewej komory serca w porównaniu z grupą trenującą wytrzymałościowo i grupą kontrolną;
 - Większe wartości wydolności fizycznej tlenowej w porównaniu z grupą kontrolną dotyczyły obu grup badanych sportowców. Najwyższą wydolnością fizyczną charakteryzowali się mężczyźni trenujący wytrzymałościowo;
 - W odniesieniu do wydolności fizycznej beztlenowej wykazano, iż mężczyźni trenujący siłę mięśniową charakteryzowali się większą mocą średnią i średnią mocą utrzymania w porównaniu ze sportowcami trenującymi wytrzymałościowo;
4. U młodych mężczyzn- sportowców podejmujących przez okres co najmniej 2 lat, regularny trening fizyczny o różnym charakterze wysiłku fizycznego, obserwowano zmienioną w porównaniu do grupy kontrolnej ekspresję cząsteczek miRNA w spoczynku:
 - Niezależnie od charakteru podejmowanego treningu fizycznego: siły mięśniowej lub wytrzymałościowego, obserwowano wyższy poziom ekspresji miRNA klas: miR-29b i miR-221 oraz obniżony poziom ekspresji miR-133
 - Sportowców o dominującym treningu wytrzymałościowym dodatkowo charakteryzowały wysokie wartości ekspresji miR-1 i miR-27a
 - Grupę trenującą siłę mięśniową, charakteryzowały niższe wartości ekspresji miR-1 i miR-27a i miR-133 w odniesieniu do pozostałych badanych mężczyzn

5. W badaniu wykazano zależność między poziomem ekspresji cząsteczek miRNA w spoczynku, a wybranymi wskaźnikami wytrenowania:
 - Poziom ekspresji miR-29b, wykazał dodatnią zależność ze stężeniem testosteronu całkowitego i wolnego we wszystkich badanych grupach;
 - Wysoki poziom ekspresji miR-221 u sportowców wiązał się z wyższą tlenową wydolnością fizyczną organizmu;
 - Poziom ekspresji miR-133 był odwrotnie zależny od zdiagnozowanych cech serca sportowca w badanych grupach, bez względu na rodzaj treningu fizycznego;
 - U sportowców o dominującym treningu wytrzymałościowym obserwowano wysoki poziom ekspresji miR-1, który związany był z mniejszym efektem hipertrofii mięśni szkieletowych oraz wyższymi wskaźnikami wentylacji minutowej na progu przemian beztlenowych podczas intensywnych wysiłków fizycznych;
 - Grupę o dominującym treningu siły mięśniowej charakteryzował niski poziom ekspresji miR-1, który pozostawał w dodatniej zależności z wysokim stężeniem IGF-1 i największym efektem hipertrofii mięśni szkieletowych;
 - Wysoki poziom ekspresji miR-27a w grupie sportowców trenujących wytrzymałościowo wiązał się z większym stopniem adaptacji serca do wysiłku fizycznego.
6. Zmiany ekspresji wybranych klas miRNA mogą być kolejnym wskaźnikiem charakteryzującym stopień adaptacji organizmu do różnych rodzajów treningu fizycznego oraz czynnikiem monitorującym poziom wytrenowania u młodych mężczyzn - sportowców. Szczególną przydatność w tym aspekcie wykazują klasy microRNA: miR-1, miR-27a, miR-29b, miR-133 i miR-221.

1.2 Abstract

Adaptation to various kinds of physical exercise in young males in relation to selected athletic performance indicators

INTRODUCTION AND AIM

Athletic performance indicators reflect the body adaptation process to regular physical exercise. To date, a great number of such indicators have been identified, including, among others: aerobic and anaerobic physical capacity, anthropometric and body composition measurements, cardiac structure and function parameters, biochemical parameters. With the development of medical knowledge, further indicators of some potential in athletic performance assessment are identified. Increased availability of advanced diagnostic methods, including epigenetic analysis, enables us to study the relationship between microRNA expression and a human body adaptation to physical exercise. Previous studies reported the relationships between a single indicator of exercise performance and the expression of selected microRNAs, and they were conducted in athletes practicing only one specific sport discipline or athletes engaged in sports with only one type of physical exercise dominating in their basic training. The available literature does not provide information which fully and unequivocally explains the interrelations between exercise performance indicators and microRNA expression in the context of the training modes.

The aim of this study was to assess the adaptation of young males to a variety of regular physical activity types: endurance-dominated or muscle strength - dominated training, in relation to selected classic indicators of exercise performance and biomolecular indicators including selected miRNAs expression. Further stage of this study included the analysis of the relations between the investigated indicators and selected miRNA expression in males engaged in different types of sports training.

MATERIALS AND METHODS

The study included 142 clinically healthy males aged 18-35. After applying exclusion and inclusion criteria, 116 males were eventually qualified for the study and they were divided in the following groups: athletes in endurance training (n=48), athletes performing muscle strength training (n=37) and a control group of males without any history of regular physical activity (n=31).

All the study subjects underwent medical examination including: physical activity evaluation, anthropometric measurements with evaluation of total subcutaneous body fat percentage (TSBF%), blood morphology and biochemical tests with serum levels of: glucose, insulin, insulin-like growth factor 1 (IGF-1), cortisol, total and free testosterone, dehydroepiandrosterone sulfate (DHEA-S), creatine kinase (CK), lactate dehydrogenase (LDH) and the assessment of selected microRNAs expression. Biomolecular analysis included the expression of the following microRNAs: miR-1, miR-27a, miR-29b, miR-133, miR-206 and miR-221. All the tests were performed in real time qPCR reaction using CustomTaqMan® ArrayMicroRNA Cards. Also, non-invasive assessment of cardiac structure and function was performed in the study males at rest during 12-lead ECG and echocardiography examination.

To evaluate aerobic and anaerobic capacity of the study subjects, modified Costill-Fox treadmill ergospirometry test (CPET) and cycloergometer Wingate test (Bar-Or) were performed.

Psycho-emotional status and training motivation were evaluated using Profile of Mood State (POMS) questionnaire in order to detect symptoms of non-functional overreaching and overtraining syndrome NFO/OTS. All the collected data were statistically analyzed using Statistica v.13 software and $p \leq 0,05$. was considered as statistically significant.

RESULTS

The analysis of the obtained data revealed statistically significant differences in most of the analyzed exercise performance indicators and miRNA expression levels between the athletes and the control group. With regard to anthropometric measurements, athletes in endurance training were found to have the lowest body weight and lower values of the circumference of: waist, arm, hip and thigh. The highest value of arm circumference was recorded in the athletes in muscle strength training. 14% subcutaneous adipose tissue was recorded in both groups of athletes, which was significantly lower a value than in the control group with a mean value of 22%.

No significant differences were observed in biochemical parameters between both groups of athletes. The control group showed significantly higher values of TG, TC, LDL-C and significantly lower level of HDL-C than both groups of athletes. Total serum testosterone level in the control group was significantly reduced when compared to muscle strength training athletes (5,3 vs 6,2) and lower than in endurance training athletes (5,3 vs 5,6 [ng/ml]).

Aerobic capacity (VO₂max) values were found to be higher in both groups of athletes than in the control group (56 & 54 vs 44 [ml/kg/min]). Endurance-trained athletes were characterized by higher minute ventilation and oxygen uptake measured at the anaerobic threshold than the other study groups.

The highest anaerobic capacity parameters were observed in muscle strength training athletes. In comparison to the athletes in endurance training they presented significantly higher values of mean power (620 vs 480 [W]) and mean maintenance power (747 vs 616 [W]). No significant differences in anaerobic capacity parameters were observed in the control group when compared with the athletes and the values fell within the range of the highest values recorded in muscle strength training athletes and the lowest ones recorded in the athletes in endurance training.

Endurance training athletes were also characterized by lower resting heart rate when compared to the other athletes and the control group (60 vs 67 vs 69 [n/min], $p < 0.05$).

Echocardiography results were comparable in all study groups with only a few indicators showing statistical significance. Significantly higher values of end-diastolic volume (141 vs 126 [ml]) and left ventricular stroke volume (101 vs 94 [ml]) were recorded in the athletes in muscle strength training. When all three study groups were compared, the highest ejection fraction (EF) value was observed in the muscle strength training athletes vs endurance and control groups (71 vs 70 vs 67 [%]).

The evaluation of resting miRNA expression revealed significant differences in the following classes: miR-29b, miR-133 and miR-221 between both groups of athletes and the control group. Physical activity, irrespective of its type, resulted in an increase of resting expression levels of miR-29b and miR-221 and decreased levels of miR-133 in comparison to the control group.

The expression level of miR-1 varied depending on the type of regular exercise training. Endurance training caused upregulation of miR-1 expression whilst muscle strength training resulted in its downregulation. Regular physical activity also led to downregulation of miR-133 expression regardless of the type of athletic training. The highest miR-27a expression levels were detected in endurance training athletes. They were also characterized by higher resting levels of miR-1, miR-27a, miR-29b, miR-221 and lower miR-133 expression levels when compared to the control group whereas athletes performing muscle strength training showed higher expression levels of: miR-29b and miR-221 and lower expression levels of: miR-1, miR-27a and miR-133 than the other study groups.

A range of statistically significant relationships between the analyzed exercise performance indicators and selected miRNAs expression were observed in the study. The strongest correlations were noted between muscle-specific miRNAs: miR-1 and miR-133 and anthropological measurements, biochemical and echocardiographic parameters as well as aerobic and anaerobic capacity. The study showed that lower miR-1 and miR-133 expression levels in muscle strength training athletes correlated with higher muscle

circumference than observed in endurance-trained athletes and with insignificantly higher thickness of the fat fold and TSBF%.

Opposite observations were made in endurance-trained athletes in whom higher expression levels of miR-1 and miR-133 were observed along with reduced muscle circumference and slightly lower thickness of the fat fold and TSBF%.

In both groups of analyzed athletes high positive correlations were found between cardiac-specific miRNAs: miR-27a and miR-29b and aerobic capacity parameters: VO₂max, dVO₂/dWR, VE/VCO₂slope, and anaerobic capacity parameters: Tppm, DR%Pp, DR%Ppp and echocardiographic measurements: LVIDd, IVSd, LVPWd, LVPWw and RWT. The obtained results were found to be similar in both groups of athletes.

In the analyses of biochemical and morphological blood serum indicators of exercise performance the most significant positive correlations were identified between IGF-1 and LDH levels and miR-1 expression in the muscle strength training athletes and between free and total testosterone level and the expression of miRNAs: -1, -27a, -29b, -133, -221 in all the study groups. High miR-1 expression level was connected with reduced skeletal muscle hypertrophy in athletes in muscle strength training and with elevated values of minute ventilation during high-intensity, predominantly aerobic exercise in the endurance-trained athletes. High IGF-1 level was shown to correlate positively with low expression level of miR-1, which was observed in athletes in muscle strength training.

High expression level of miR-27a was correlated with higher aerobic capacity and the correlations were comparable in the control group and in both groups of athletes. What proved to be significant for the evaluation of human body adaptation to physical activity was positive correlations between miR-29b expression and total and free testosterone levels in muscle strength training athletes and positive correlations between miR-29b expression and TSBF% in both analyzed groups of athletes.

The lowest miR-133 expression levels detected in muscle strength training athletes reflected a high level of adaptation to intensive exercise, which was represented by very distinctive echocardiographic ventricle measurements typical of exercise-induced adaptations. This was especially true for relative left ventricle wall thickness, its diameters and stroke volume. In relation to the control group both groups of athletes showed features of cardiac morphological and functional adaptation to regular physical activity which were strongly related to miR-133 expression: the lower the expression level, the higher the adaptation observed.

The analysis of MiR-206 expression correlation with athletic performance indicators did not show any significance in the assessment of adaptation to physical activity regardless of the kind of training performed.

Higher expression level of miR-221 in the analyzed athletes was correlated with higher aerobic capacity regardless of the sports discipline.

RESULTS SUMMARY AND CONCLUSIONS

1. In young, healthy males, body adaptation to physical activity is dependent on the type of exercise which dominates in the performed training.
2. Endurance and muscle strength training results in a variety of adaptive changes in athletes detected in the following performance indicators: body composition and anthropometric measurements, biochemical blood serum indicators, echocardiographic parameters of cardiac structure and functioning, aerobic and anaerobic capacity. It was found that the adaptation process characteristics may be significantly enriched by biomolecular indicators, including selected miRNAs expression.
3. Depending on the dominant type of exercise in training, the analyzed athletes were characterized by the following features of adaptation to regular physical activity:
 - With regard to body composition, muscle strength training athletes showed higher values of waist, hip, arm and thigh circumference when compared to endurance training group; total subcutaneous body fat percentage in both groups of athletes was lower in comparison to the control group;

- The study did not reveal any significant differences in serum biochemical parameters in relation to the type of performed training. There was only a trend towards higher creatine kinase, free testosterone, cortisol and IGF-1 serum levels in muscle strength training group in comparison to the other study males;
 - Adaptive changes in cardiovascular system were detected as a slower resting heart rate in both groups of athletes when compared to the control males. A significantly higher values of end-diastolic left ventricle volume and stroke volume were observed in muscle strength-dominated training athletes than in other study groups;
 - Increased aerobic capacity was observed in all the athletes in comparison to the control group, with the highest values recorded in endurance-trained individuals;
 - As far as anaerobic capacity is concerned, higher values of mean and mean maintenance power were observed in athletes involved in muscle strength training than in endurance-trained ones.
4. Unlike in the control group, in young, healthy athletes engaged in regular training of varied exercise types for at least 2 years, changes to miRNA expression at rest were observed.
- Upregulation of miR-29b and miR-221 and downregulation of miR-133 were observed in the study athletes regardless of dominant type of exercise in their training;
 - Higher expression levels of miR-1 and miR-27a were observed in endurance-trained athletes;
 - Muscle strength training athletes showed lower expression levels of miR-1, miR-27a and miR-133 at rest in comparison to the other study males;
5. The study revealed an important correlation between selected resting miRNAs expression levels and the following athletic performance indicators:
- Resting miR-29b expression level was found to be positively correlated with free and total serum testosterone levels in all study groups;
 - High resting miR-221 expression level was correlated with high aerobic capacity in the study athletes;
 - Resting miR-133 expression level was negatively correlated with the recorded cardiac parameters in the study athletes, regardless of the performed type of training;
 - In endurance-trained athletes a high resting miR-1 expression level was observed, and it was correlated with reduced skeletal muscle hypertrophy and elevated values of minute ventilation measured at anaerobic threshold during high-intensity exercise;
 - Muscle strength training athletes were characterized by a lower resting miR-1 expression level which was positively correlated with a high IGF-1 level and with the greatest skeletal muscle hypertrophy;
 - High resting miR-27a expression level in endurance-trained athletes was found to be connected with enhanced cardiac adaptation to physical activity.
6. Changes in selected miRNAs expression showed some potential as indicators of the extent of human body adaptation to a variety of physical training types as well as a monitoring factor in exercise performance in young male athletes. Several specific microRNAs i.e.: miR-1, miR-27a, miR-29b, miR-133 and miR-221 microRNA were found to be especially promising in such assessment.