

HANNA DRZYMAŁA-CELICHOWSKA^{1,2}, JAN CELICHOWSKI²

¹*Zakład Biochemii*

²*Zakład Neurobiologii*

Akademia Wychowania Fizycznego w Poznaniu

Królowej Jadwigi 27/39, 61-871 Poznań

E-mail: drzymala@awf.poznan.pl

celichowski@awf.poznan.pl

CZY CECHY SKURCZU MIĘŚNI SZKIELETOWYCH SĄ ZALEŻNE OD PŁCI?

Kroniki sportu dokumentują rozwój sportu kobiet i mężczyzn, który toczy się dwutorowo, ale też odnotowują przypadki, w których sprawa płci sportowców staje się problemem. Jeden z nich to bardzo pasjonująca i pełna kontrowersji historia: do najpopularniejszych polskich sportowców okresu międzywojennego należała bez wątpienia Stanisława Walasiewicz, która wraz z rodzicami jako niemowlę wyemigrowała do USA w 1911 r. W latach 30. w Polsce czterokrotnie zwyciężała w Plebiscycie Przeglądu Sportowego i była również laureatką Wielkiej Honorowej Nagrody Sportowej. Te zaszczyty spotkały ją za wspaniałe osiągnięcia sportowe, między innymi: złoty medal olimpijski na olimpiadzie w Los Angeles, który zdobyła jako reprezentantka naszego kraju, wielokrotne złote medale na Światowych Igrzyskach Kobiet i na Mistrzostwach Europy. Była nie tylko wspaniałą sprinterką, która aż 14-krotnie poprawiała rekordy świata w trakcie swojej kariery sportowej, ale również miała znakomite wyniki w skoku w dal (lepsze od oficjalnego rekordu świata z tego okresu), była wielokrotnie mistrzynią Polski (w biegach na 60 m, 100 m, 200 m, skoku w dal, skoku w dal z miejsca, rzucie oszczepem, 3-boju, 5-boju) oraz 54-krotną rekordzistką Polski. Fenomen sportowy. Ale czy tylko talent? Światło na tą sprawę rzucił pewien tragiczny wypadek. Mianowicie, spotkał ją dramatyczny koniec życia. W 1980 r. w

USA (do których wróciła jeszcze przed wojną), zginęła postrzelona w czasie napadu na sklep. Zgodnie z amerykańskim prawem jej ciało poddano sekcji zwłok. Wówczas okazało się, że posiadała żeńskie i męskie narządy płciowe, choć nie w pełni rozwinięte (czyli że była osobą interseksualną). Badania genetyczne wykazały, że posiadała też chromosom Y (który u kobiet nie występuje). Choć wzbudziło to dyskusje, to jednak zarówno Międzynarodowy Komitet Olimpijski, jak i Międzynarodowa Federacja Lekkiej Atletyki oficjalnie nie unieważniły jej wyników sportowych i medali. Niezależnie od tych decyzji, przypadek tej sportsmanki zwraca uwagę na problem wpływu płci na uwarunkowania sportowe.

Proces wdrażania równouprawnienia kobiet i mężczyzn rozpoczął się około 100 lat temu. Doskonale wiemy, że dotyczy wielu dziedzin, ale nie sportu. W większości dyscyplin konkurencja sportowa odbywa się osobno dla kobiet i mężczyzn i nic nie wskazuje, by miało się to zmienić. Chociaż równoległy rozwój sportu męskiego i żeńskiego początkowo był kwestią decyzji podejmowanych intuicyjnie (a w zasadzie najpierw sport był domeną wyłącznie męską), stopniowo pojawiały się dowody naukowe potwierdzające zasadność takiego rozdziału. A więc, dlaczego tak właśnie powinno być zorganizowane życie sportowe? Celem tego artykułu nie jest wskazanie wszystkich argumentów odnoszą-

Słowa kluczowe: jednostki ruchowe, mięśnie szkieletowe, motoneurony, różnice płciowe, włókna mięśniowe, wrzeciona mięśniowe

* Wyniki podsumowane w artykule są efektami realizacji następujących projektów badawczych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego i Narodowego Centrum Nauki: grant N N404 197637 *Zróżnicowanie unerwienia motorycznego i struktury mięśni szkieletowych kończyn tylnych samców i samic* i grant 2018/31/B/NZ7/01028 *Różnice płciowe głównych elementów odruchu na rozciąganie: motoneuronów oraz wrzecion mięśniowych*.

cych się do podstaw organizacji odrębnych zawodów sportowych dla sportowców obu płci, ale chcielibyśmy podsumować wyniki badań prowadzonych przede wszystkim w naszym laboratorium, w których na modelach zwierzęcych staraliśmy się odkryć, czym z punktu widzenia fizjologii różnią się mięśnie samców i samic. Zastosowanie modeli zwierzęcych pozwala na przeprowadzenie badań, jakie nie są możliwe do wykonania na ludziach, a prawdopodobnie z tego powodu w naszej wiedzy o międzypłciowych różnicach czynności mięśni (skądinąd dość podstawowej w naukach o sporcie) występowała wyraźna i dość zdumiewająca luka w zakresie podstawowej wiedzy, którą staraliśmy się wypełnić.

Faktem dość oczywistym jest, że kobiety i mężczyźni wyraźnie się różnią masą i wysokością ciała, a masa mięśni jest znacząco większa u mężczyzn. Natomiast dalsza wiedza o tym, czym różni się praca tych mięśni, była zaskakująco uboga. Z punktu widzenia funkcji mięśni, ogromne znaczenie ma metabolizm włókien mięśniowych. Włókna mięśniowe mogą charakteryzować się dwoma podstawowymi rodzajami metabolizmu: tlenowym (warunkującym możliwość długiej pracy bez zmęczenia) lub glikolitycznym (powiązanym z większą siłą skurczu). W zasadzie wszystkie mięśnie człowieka zawierają (w różnych proporcjach) włókna mięśniowe cechujące się jednym i drugim rodzajem metabolizmu. Włókna mięśniowe różnych typów charakteryzują się różnymi cechami skurczu. Ważna jest też całkowita liczba i średnica włókien mięśniowych, które są powiązane z masą mięśniową. Te wszystkie cechy odnoszące się do mięśni szkieletowych są istotnym elementem decydującym o uwarunkowaniach motorycznych. Charakterystyka różnic międzypłciowych w tym zakresie jest więc bardzo istotna w odniesieniu do wyjaśnienia różnic uwarunkowań sportowych kobiet i mężczyzn.

W naszym laboratorium prowadzimy (na modelach zwierzęcych) badania cech skurczu jednostek ruchowych, badania histologiczne mięśni, badania struktur neuroanatomicznych, w tym jąder ruchowych, czyli skupisk neuronów motorycznych (motoneuronów) unerwiających jeden mięsień, oraz badamy cechy elektrofizjologiczne motoneuronów. Jednostki ruchowe (motoryczne) są to najmniejsze czynnościowe elementy mięśni szkieletowych. Oznacza to, że podczas ruchów nie pracują całe mięśnie, lecz tylko większa lub mniejsza liczba ich aktywowanych do ruchu (rekrutowanych) jednostek ruchowych. Dzieje się tak dlatego, że jednostkę ruchową tworzy jeden motoneuron, znajdujący się w rdzeniu kręgowym lub

pnieniu mózgu, a każdy taki neuron poprzez swój akson biegnący w nerwie do danego mięśnia unerwia określoną liczbę włókien mięśniowych. Każde włókno mięśniowe jest unerwiane tylko przez jeden motoneuron, dzięki czemu należy tylko do jednej jednostki ruchowej. W trakcie realizacji każdego ruchu to właśnie motoneurony są jedynym źródłem pobudzenia włókien mięśniowych. Same motoneurony są pobudzane przez inne neurony tworzące sieć neuronalną w ośrodkowym układzie nerwowym (OUN). Ale czy i w jaki sposób ewidentne międzypłciowe różnice masy mięśniowej wiążą się z różnicami liczby jednostek ruchowych w tych mięśniach? Czy mięśnie przedstawicieli obu płci mają taką samą liczbę jednostek ruchowych i czy ich jednostki ruchowe mają taką samą strukturę, a procesy regulacji siły odbywają się jednakowo? Te podstawowe pytania zainspirowały nas do wykonania dwóch serii doświadczeń: na mięśniu brzuchatym przyśrodkowym łydki (łac. *m. gastrocnemius medialis*, przykładowy mięsień szybki, z wyraźną przewagą włókien mięśniowych szybkich) oraz na mięśniu płaszczkowatym (łac. *m. soleus*, przykładowy mięsień wolny, z przewagą włókien mięśniowych wolnych) u zwierząt eksperymentalnych – szczurów wędrownych Wistar. Oba mięśnie są mięśniami lokomocyjnymi, położonymi w obrębie łydki.

Czym różnią się między sobą różne typy włókien mięśniowych oraz typy jednostek ruchowych i dlaczego ich proporcja jest istotna do porównywania uwarunkowań motorycznych kobiet i mężczyzn? Już od ponad pół wieku wiemy, że mięśnie szkieletowe zawierają trzy podstawowe typy włókien mięśniowych: SO, FG i FOG (ang. slow oxidative, fast glycolytic, fast oxidative-glycolytic) (BROOKE i KAISER 1970). Typy włókien mięśniowych zostały określone na podstawie badań histochemicznych aktywności enzymów powiązanych z różną formą metabolizmu. Włókna mięśniowe typu SO cechuje metabolizm tlenowy, włókna FG metabolizm glikolityczny, a włókna FOG charakteryzuje mieszany metabolizm – posiadają zarówno enzymy metabolizmu tlenowego, jak i glikolitycznego. Jak wcześniej wspomniano, to metabolizm decyduje o cechach skurczu. Ponieważ wszystkie włókna mięśniowe, które są unerwiane przez jeden motoneuron (czyli tworzące jednostkę ruchową) są tego samego typu, łatwo można się domyślić, że podobnie jak dzieli się włókna mięśniowe na trzy typy, tak samo w mięśniach występują trzy główne typy jednostek ruchowych. Klasyfikacja jednostek ruchowych i udowodnienie związku typu włókien mięśniowych z cechami skurczu jednostek ruchowych jest osiągnięciem sprzed ponad 45 lat grupy prof.

Burke (BURKE i współaut. 1973). Zaproponowali oni podział jednostek ruchowych w mięśniach szkieletowych na trzy podstawowe typy: wolne (ang. slow, S), szybkie odporne na zmęczenie (ang. fast resistant, FR) i szybkie męczące się (ang. fast fatigable, FF). Zawierają one odpowiednio włókna mięśniowe typów SO, FOG i FG. Jednostki ruchowe wolne cechuje długi czas skurczu pojedynczego, wywołanego jednorazowym pobudzeniem (czas takiego skurczu to ułamek sekundy), niska siła i bardzo wysoka odporność na zmęczenie, powiązana z metabolizmem tlenowym ich włókien mięśniowych (patrz artykuł CELICHOWSKI i KRUTKI w tym zeszycie KOSMOSU). Jednostki te wykorzystujemy bardzo długo każdego dnia, gdyż są angażowane w skurcze antygrawitacyjne, pozwalające na utrzymanie postawy ciała. Jednostki szybkie odporne na zmęczenie mają krótki czas skurczu pojedynczego, dość wysoką odporność na zmęczenie i przeciętną siłę skurczu. Wykorzystujemy je podczas wielu ruchów, takich jak chodzenie, a w mięśniach kończyn dolnych są czynne w ciągu doby łącznie przez kilkadziesiąt minut. Z kolei jednostki ruchowe szybkie nie odporne na zmęczenie mają również krótki czas skurczu pojedynczego, niską odporność na zmęczenie; mogą pracować kilkanaście-kilkadziesiąt sekund nim znacznie się znaczący spadek ich siły, ale ich walorem jest bardzo wysoka siła skurczu. Niewątpliwie, te jednostki ruchowe są używane rzadko, wiele z nich nie kurczy się ani razu w trakcie niejednego dnia. Jeżeli są aktywowane, to czas ich aktywacji w czasie doby łącznie nie przekracza kilkudziesięciu sekund, a dzieje się to podczas ruchów takich jak: wchodzenie po schodach, skoki, szybki bieg (sprint). Wiemy również, że poszczególne mięśnie w znaczącym stopniu różnią się składem włókien mięśniowych i jednostek ruchowych różnych typów, co wiąże się z ich przystosowaniem do bardzo zróżnicowanych poziomów aktywności. Natomiast wiedza o tym, czy istnieją i jakie są różnice międzypłciowe oraz czy cechy włókien mięśniowych i jednostek ruchowych tego samego typu różnią się w zależności od płci są dopiero poznawane, choć są to podstawowe problemy, wyjaśniające m.in. różnice efektów treningu kobiet i mężczyzn (ROBERTS i współaut. 2020).

Podobnie jak u ludzi, w świecie zwierząt również widocznych jest wiele elementów dymorfizmu płciowego. Jednak badania różnic międzypłciowych mięśni szkieletowych są nieliczne. Kilka dostępnych publikacji z przełomu XX i XXI w. dotyczyło różnic płciowych w zawartości miozyny. Miozyna jest jednym z najważniejszych białek mięśniowych, której czynność bezpośrednio wiąże

się ze skracaniem mięśni lub wytwarzaniem siły ich skurczu (w zależności od oporu jaki napotyka mięsień) (patrz artykuł WOJTON i REDOWICZ w tym zeszycie KOSMOSU). We włóknach mięśni szkieletowych białko to występuje w postaci czterech izoform: I, IIa, IIx i IIb. Różne izoformy miozyny determinują m.in. prędkość skracania włókien mięśniowych (najniższą ma miozyna typu I), a występują w różnych typach włókien. Miozyna typu I jest charakterystyczna dla włókien SO, typu IIa dla włókien FOG, a miozyny IIx i IIb dla włókien FG (choć jest możliwe występowanie jednocześnie dwóch typów miozyny w jednym włóknie mięśniowym) (MEDLER 2019). Jak z tego wynika, czynność mięśnia zależy w pewnym stopniu od zawartości miozyny, a proporcje ich zawartości w mięśniach są cechą istotą. ENGLISH i współaut. (1999) jako jedni z pierwszych wykazali, że w mięśniu żwacza (łac. *m. masseter*) samców królika występuje więcej włókien mięśniowych typu IIA (czyli zawierających miozynę typu IIa), a zarazem jest mniej włókien wolnych z miozyną typu I, natomiast średnica włókien mięśniowych szybkich typu IIA jest większa niż u samic. W przypadku badanych przez nasz zespół szczurów rasy Wistar, samce są znacząco większe (mają o około 87% większą masę ciała), a masa badanego przez nas mięśnia kończyny tylnej (brzuchatego przysiódkowego łydki) również się różni (jest około 53% większa niż u samic) (CELICHOWSKI i DRZYMAŁA 2006). Warto jednak uzupełnić, że udział masy tego mięśnia w masie ciała okazał się wyższy u samic (Tabela 1). Gdy w badaniach histologicznych (mikroskopowa obserwacja skrawków przekroju poprzecznego mięśnia) określona została liczba jego włókien mięśniowych, zgodnie z oczekiwaniami okazało się, że jest ona o 47% większa u samców (średnio 11636 włókien) niż u samic (średnio 7913 włókien) (MIERZEJEWSKA-KRZYŻOWSKA i współaut. 2011). Ponieważ w ramach tego badania określaliśmy również średnicę włókien mięśniowych, okazało się, że była ona również większa o około 14% u samców. Zbliżone wyniki zaobserwowaliśmy również dla kilku innych mięśni tylnej kończyny (piszczelowego przedniego, prostownika krótkiego palców i płaszczkowatego) (MIERZEJEWSKA-KRZYŻOWSKA i współaut. 2012). Zatem można było podsumować, że z większą masą mięśniową samców wiąże się przede wszystkim większa liczba ich włókien mięśniowych, ale dodatkowo również większa średnica włókien. Gdy dane dotyczące liczby włókien mięśniowych zostały połączone z wynikami pomiaru siły skurczu teżowego mięśnia (wywoływanego stymulacją dochodzącego do niego nerwu) można było obliczyć średnią wartość siły skurczu

jednego włókna mięśniowego; w przypadku samców było to 0,701 mN, a w przypadku samic 0,661 mN (MIERZEJEWSKA-KRZYŻOWSKA i współaut. 2011). Ta analiza pozwoliła ustalić, że przeciętnie pojedyncze włókno mięśniowe w przypadku samców ma większą średnicę i generuje siłę skurczu wyższą o około 6% niż u samic.

W innej serii badań elektrofizjologicznych izolowano czynnościowo jednostki ruchowe mięśnia brzuchatego przysrodkowego łydki u szczurów rasy Wistar i analizowano cechy ich skurczu. Czynnościowa izolacja polegała na pobudzaniu bodźcami elektrycznymi (pojedynczymi lub ich ciągami) wyizolowanego z korzenia brzuszno-nerwu rdzeniowego aksonu unerwiającego włókna mięśniowe badanego mięśnia, co pozwalało na rejestrację skurczów (pojedynczych lub tęczy) tej jednostki ruchowej. Badania takie wykonane zostały na dwóch grupach zwierząt, samców i samic, dla każdej z tych grup rejestrowano po ponad 100 jednostek ruchowych, a średnie wyniki dla każdej z tych dwóch grup były porównywane. Po pierwsze, na podstawie podstawowych cech skurczu (czas i siła skurczu pojedynczego oraz odporność na zmęczenie), jednostki ruchowe były klasyfikowane na trzy podstawowe typy: S, FR i FF. Następnie porównywano była proporcja jednostek ruchowych tych typów u zwierząt obu płci. Wyniki tej analizy wykazały, że u samców był mniejszy udział jednostek typu S, a większy udział jednostek typu FF, w porównaniu do samic (CELICHOWSKI i DRZYMAŁA 2006). Choć nie ma wielu danych odnoszących się do różnic płciowych w proporcji jednostek ruchowych lub włókien mięśniowych, warto przypomnieć, że zbliżoną obserwację poczynili wcześniej ENGLISH i współaut. (1999) w odniesieniu do mięśnia zwiacza, który u samicy królika zawiera więcej włókien mięśniowych wolnych, a mniej typu IIa niż u samców. Druga część analiz dotyczyła porównania cech skurczu jednostek ruchowych trzech typów. Przede wszystkim zaobserwowano, że czas skurczu pojedynczego był istotnie krótszy dla jednostek ruchowych wszystkich trzech typów u samic. Ponadto, siła skurczu jednostek ruchowych u zwierząt tej płci była niższa. Natomiast wartości tzw. wskaźnika zmęczenia, ilustrującego odporność na zmęczenie w teście trwającym 2 min, różniły się tylko dla jednostek typu FR, które miały nieco wyższą odporność u samic (CELICHOWSKI i DRZYMAŁA-CELICHOWSKA 2007). Wymienione badania zwróciły uwagę na większą proporcję włókien mięśniowych wolnych u żeńskich przedstawicieli badanych zwierząt, co przynajmniej w odniesieniu do mięśni kończyn można wiązać z większym procentowo an-

gażowaniem się jednostek ruchowych tych mięśni (ściśle – właśnie wolnych jednostek) w utrzymanie postawy ciała. Taki wniosek wydaje się uzasadniony biorąc pod uwagę fakt, że samice cechuje mniejsza masa mięśni. Opisane powyżej obserwacje wiążą się również z, opisywaną w różnych badaniach prowadzonych na ludziach, większą odpornością na zmęczenie u kobiet (HICKS i współaut. 2001).

Jak wcześniej wspomniano, każde włókno mięśniowe jest unerwiane tylko przez jeden neuron motoryczny, czyli należy do jednej jednostki ruchowej (BURKE 1981). Ponieważ dla najczęściej badanego w naszej pracowni mięśnia brzuchatego łydki mieliśmy już dość liczne dane odnoszące się do siły skurczu całego mięśnia (wywoływanego podczas stymulacji nerwu, gdy aktywowane są wszystkie aksony motoneuronów unerwiających ten mięsień) oraz średnie wartości sił skurczu jednostek ruchowych, zarówno poszczególnych typów, jak i wszystkich jednostek (wywoływanego podczas stymulacji tylko jednego aksonu zmierzającego do mięśnia), można było dokonać dalszych porównań międzypłciowych. Po pierwsze, dzięki porównaniu siły skurczu mięśnia ze średnią siłą skurczu jednostek ruchowych obliczono, że w badanym mięśniu u samców występuje 57 jednostek, a u samic 52 (CELICHOWSKI i DRZYMAŁA-CELICHOWSKA 2007), co stanowi różnicę ok. 10-procentową. Znajac liczbę jednostek ruchowych i włókien mięśniowych w mięśniach u zwierząt obu płci (już wspomniane średnio 11636 u samców i 7913 u samic) można było obliczyć, że jeden motoneuron u samców unerwia średnio 206 włókien mięśniowych, a u samic 152 włókna (MIERZEJEWSKA-KRZYŻOWSKA i współaut. 2011). Ta różnica stanowi w przybliżeniu 35% (Tabela 1). Zatem wynik ten, w połączeniu z wyższą o 6% siłą skurczu przeciętnego włókna mięśniowego samców, pozwala w pełni wyjaśnić wyższą, przeciętnie o 43% siłę skurczu jednostek ruchowych samców. Natomiast na podstawie proporcji występowania jednostek ruchowych trzech typów zostało oszacowane, że przeciętnie mięsień samca składa się z 8 jednostek typu S, 23 typu FR i 26 typu FF, a u samicy jest to 12 jednostek typu S, 19 typu FR i 20 typu FF (Tabela 1). Biorąc pod uwagę średnią siłę skurczu jednostek ruchowych trzech typów oraz ich udział w strukturze mięśnia obliczyliśmy, że w mięśniach samców jednostki ruchowe wolne odpowiadają za 5% siły wyjściowej mięśnia, jednostki FR za 30%, a FF za 65%, natomiast u samic wartości te wynoszą odpowiednio: 10%, 27% i 63% siły mięśnia (CELICHOWSKI i DRZYMAŁA-CELICHOWSKA 2007). Podsumowując te ob-

Tabela 1. Główne różnice płciowe dotyczące mięśnia brzuchatego przyśrodkowego łydki szczura (wartości średnie i odchylenia standardowe). W ostatniej kolumnie wskazano stosunek wartości danej cechy u samców do tej wartości u samic.

	samce	samice	stosunek wartości samce/samice
Masa ciała (g) ^a	478,1±66,3	255,8±30,7	1,87
Masa mięśnia (g) ^a	0,97±0,09	0,63±0,05	1,53
Masa mięśnia/masa ciała ^a	0,20±0,02	0,24±0,01	0,83
Siła skurczu mięśnia (N) ^b	8,26±0,75	5,25±0,27	1,57
Liczba włókien mięśniowych ^c	11636±1558	7913±1570	1,47
Średnica włókien mięśniowych (μm) ^c	57,99±6,41	50,86±4,89	1,14
Pole przekroju wł. mięśniowego (μm ²) ^c	2943±585	2292±591	1,28
Siła skurczu jednego włókna (mN) ^c	0,701	0,661	1,06
Średnica motoneuronów α (μm) ^d	39,51±5,57	37,44±5,28	1,05
Liczba jednostek ruchowych ^b	57	52	1,10
w tym:			
- jednostki typu S	8	12	0,66
- jednostki typu FR	23	19	1,21
- jednostki typu FF	26	21	1,23
Współczynnik unerwienia ^c	206	152	1,35
Siła skurczu jednostek (mN) ^b	144,3	100,8	1,43
Czas skurczu jednostek (ms) ^b	15,7±4,6	15,2±4,5	1,03
Zawartość miozyn ^e			
- typu IIa (%)	8,01±2,97	7,45±2,57	1,07
- typu IIx (%)	28,17±4,35	25,66±4,02	1,09
- typu IIb (%)	57,89±5,98	60,35±6,36	0,95
- typu I (%)	5,93±1,46	6,52±1,15	0,90
Liczba wrzecion mięśniowych ^f	14,0±2,7	13,1±1,2	1,07
Liczba motoneuronów γ ^d	28,7±6,6	27,6±3,8	1,03
Masa mięśnia na jedno wrzeciono (mg) ^e	77	50	1,54

Dane do tabeli pochodzą z publikacji: CELICHOWSKI i DRZYMAŁA 2006^a, CELICHOWSKI i DRZYMAŁA-CELICHOWSKA 2007^b, MIERZEJEWSKA-KRZYŻOWSKA i współaut. 2011^c, MIERZEJEWSKA-KRZYŻOWSKA i współaut. 2014^d, DRZYMAŁA-CELICHOWSKA i współaut. 2012^e, CELICHOWSKI i współaut. 2019^f.

serwacje i precyzyjnie opisujące modelowy mięsień u zwierząt doświadczalnych można oczekiwać, że także w innych mięśniach ssaków (również ludzi) wolne jednostki ruchowe w mięśniach samic są liczniejsze i są odpowiedzialne za znacząco większy udział w sile mięśni. Można również oczekiwać, że kobiety mają mniej jednostek ruchowych w mięśniach, a ponadto te jednostki ruchowe składają się z mniejszej liczby włókien mięśniowych i są słabsze niż u mężczyzn.

W warunkach fizjologicznych mięśnie mogą się kurczyć wyłącznie wtedy, gdy są pobudzane przez wyspecjalizowane neurony, czyli motoneurony. Regulacja siły skurczu mięśni w kluczowym zakresie zależy od czynności tych neuronów. Pierwszym mechanizmem wpływającym na siłę skur-

czu jest rekrutacja do aktywności kolejnych motoneuronów (czyli kolejnych jednostek ruchowych), a wraz ze wzrostem (lub spadkiem) liczby czynnych jednostek wzrasta (lub maleje) siła skurczu. Ten proces nie jest przypadkowy i kolejność rekrutacji jednostek ruchowych odbywa się zawsze w takim samym porządku: najpierw jednostki typu S, następnie FR, a na końcu włączane są do aktywności jednostki typu FF. Jako pierwsi zwrócili uwagę na porządek rekrutacji HENNEMAN i współaut. (1965), którzy zaproponowali tzw. zasadę wielkości (zwaną też prawem Hennemana). Według tej zasady kolejność rekrutacji zależy od wielkości motoneuronów i jako pierwsze włączane są małe (najbardziej pobudliwe), a w dalszej kolejności większe (o mniejszej pobudliwo-

ści) motoneurony. W późniejszych badaniach potwierdzono słuszność tej hipotezy, między innymi badając wielkość motoneuronów jednostek ruchowych różnych typów i ich cechy elektrofizjologiczne. Badania te wykazały, że najbardziej pobudliwe są motoneurony jednostek wolnych, a najmniej szybkich typu FF (BURKE 1981). Różna proporcja jednostek ruchowych trzech typów w mięśniach samców i samic sugeruje, że proces rekrutacji przebiega u nich nieco odmiennie, choć spodziewane różnice w tym zakresie nie były dotąd badane. Więcej natomiast wiemy o drugim z podstawowych mechanizmów regulacji siły skurczu. Mianowicie, czynne (włączone do aktywności w procesie rekrutacji) motoneurony generują ciągi potencjałów czynnościowych, pobudzających wielokrotnie (od kilkunastu do kilkudziesięciu razy w ciągu sekundy) włókna mięśniowe tak długo, jak długo ma trwać realizacja zadania motorycznego. Wówczas włókna mięśniowe pobudzane w taki sposób generują tzw. skurcze tężcowe niepełne, których siła może się w pewnym zakresie zmieniać w zależności od częstotliwości i układu potencjałów czynnościowych motoneuronów. Zakres możliwej zmienności siły skurczów tężcowych niepełnych mieści się pomiędzy minimalną siłą skurczów pojedynczych a maksymalną siłą skurczu tężcowego pełnego. Zakresowi zmienności sił skurczu odpowiada również pewien zakres częstotliwości pobudzeń płynących ze strony motoneuronu do włókien mięśniowych, który może być badany i precyzyjnie określany w warunkach laboratoryjnych. W doświadczeniach takich stymuluje się aksony motoneuronów bodźcami o różnej częstotliwości i rejestruje siłę wywołanego skurczu. Relacja między częstotliwością pobudzeń a siłą jest ściśle zależna od przebiegu skurczu pojedynczego (KERNELL i współaut. 1983), a jak wcześniej wspomniano – okazał się on krótszy dla jednostek ruchowych samic. W związku z powyższym, jednostki ruchowe samic dla osiągnięcia siły na określonym poziomie (np. 50% siły maksymalnej) potrzebują wyższej częstotliwości wyładowań motoneuronów niż u samców. Jest to istotna różnica charakteryzująca pracę tych neuronów OUN. Można oczekiwać, że obserwacja ta może mieć wpływ na postęp w badaniach elektromiograficznych, często prowadzonych na ludziach. Na elektromiogram (zapis elektrycznej czynności mięśni szkieletowych, rejestrowanej elektrodami wkłuwanymi do mięśnia lub lokowanymi na skórze ponad czynnym mięśniem) ma wpływ liczba potencjałów czynnościowych jednostek ruchowych, pojawiających się w ślad za każdym potencjałem ich motoneuronów (KALRA i współaut. 2012). Można

oczekiwać, że różniąc się w zależności od płci liczba jednostek ruchowych, jak i liczba włókien mięśniowych unerwianych przez motoneurony będą skutkowały różnicami w elektromiogramie rejestrowanym podczas aktywności przynajmniej części mięśni.

Ponieważ w mięśniu brzuchatym łydki proporcja jednostek ruchowych trzech typów różniła się, pojawiło się pytanie, czy również zawartość miozyn w mięśniach kończyn jest zależna od płci. Aby odpowiedzieć na to pytanie, przeprowadzone zostały badania, które objęły cztery mięśnie kończyny tylnej szczura: brzuchaty przyśrodkowy łydki, piszczelowy przedni, zginacz palców krótki i płaszczkowaty (DRZYMAŁA-CELICHOWSKA i współaut. 2012), a zawartość miozyn oznaczana była w homogenatach mięśni. Wyniki, ku pewnemu zaskoczeniu (jako obserwacje kontrastujące z wymienionymi wcześniej badaniami ENGLISH i współaut. 1999) wykazały, że w trzech pierwszych mięśniach zawartości miozyn poszczególnych typów nie różnią się. Natomiast w mięśniu płaszczkowatym, który w odróżnieniu od trzech poprzednich szybkich mięśni jest typowym mięśniem wolnym, zaobserwowano znaczącą, zależną od płci różnicę proporcji miozyn. W mięśniach samic miozyny typu I stanowiły 98%, a w części badanych mięśni wykryto również obecność miozyny typu IIa (średnio 2%), natomiast we wszystkich badanych mięśniach samców (oprócz dominującej miozyny typu I) miozyna IIa stanowiła średnio 13%. Obserwacje wskazujące na tak wyraźną różnicę płciową były dodatkowo potwierdzone badaniami z barwieniem przeciwciałami na obecność miozyn wolnej i szybkich, jak i barwieniem histochemicznym identyfikującym szybkie i wolne włókna mięśniowe, prowadzonymi na skrawkach mięśni. Wszystkie powyższe wyniki sugerowały, że w zakresie kurczliwych białek mięśniowych, mięśnie wolne różnią się bardziej niż szybkie i postawiły nowe pytanie o różnice czynnościowe dotyczące jednostek ruchowych mięśni wolnych. Aby odpowiedzieć na to pytanie, przeprowadziliśmy drugą serię doświadczeń, w których badane było zróżnicowanie cech skurczu jednostek ruchowych mięśnia płaszczkowatego.

Masa mięśnia płaszczkowatego wykazuje różnice płciowe i jest o około 80% wyższa u samców (DRZYMAŁA-CELICHOWSKA i KRUTKI 2015). W badanej populacji jednostek ruchowych tego mięśnia, u samic i samców występowały głównie jednostki wolne i w niewielkiej liczbie jednostki szybkie typu FR. Cechy skurczu jednostek ruchowych wolnych u zwierząt obu płci znacząco się różniły. Po pierwsze, ku pewnemu zaskoczeniu, czas skurczu pojedynczego okazał się istotnie dłuższy u samic – jest to wy-

nik odwrotny niż w poprzednio opisywanym mięśniu brzuchatym. Po drugie, siła skurczu pojedynczego jednostek ruchowych była zbliżona u samic i samców, ale siła skurczu tężcowego okazała się w przybliżeniu dwukrotnie wyższa u samców niż u samic (co odpowiada różnicy masy mięśnia). Jednak, jak już wspomniano, siła skurczu jednostek ruchowych może być sterowana poprzez zmiany częstotliwości wyładowań motoneuronów. Uzyskane wyniki wskazały, że około dwukrotnie większa skala możliwej regulacji siły u samców sugeruje znacząco większe możliwości ośrodkowego układu nerwowego (motoneuronów) w odniesieniu do regulacji siły niż u samic i występowanie różnic związanych z procesami regulacji siły skurczu (DRZYMAŁA-CELICHOWSKA i współaut. 2015). Można zatem oczekiwać (przynajmniej w odniesieniu do wolnych mięśni) interesujących wyników badań u ludzi, gdzie w doświadczeniach z rejestracją elektromiograficzną można uzyskać informacje o pracy motoneuronów podczas skurczów dowolnych. Dodatkowo, wolniejszy skurcz pojedynczy jednostek ruchowych u samic (wpływający na relację pomiędzy siłą skurczu a częstotliwością pobudzeń włókien mięśniowych) sugeruje niższe tempo wyładowań ich motoneuronów, co również wymaga weryfikacji doświadczalnej. Wydaje się, że ta hipoteza ma pewne wsparcie w wynikach badań częstotliwości wyładowań motoneuronów mięśni zwozaka królika (z dużym udziałem jednostek ruchowych wolnych), które okazały się być wyższe u samców (ENGLISH i WIDMER 2003).

Zestawienie wyników badań mięśnia szybkiego (brzuchatego przysrodkowego łydki) i wolnego (płaszczkowatego) wyraźnie wskazuje, że różnice międzypłciowe cech ich jednostek ruchowych w przypadku obu mięśni są znaczące, ale odmienne i zapewne ostateczne wyjaśnienie problemu wymagać będzie szeregu dalszych badań, w tym wspomnianych badań elektromiograficznych prowadzonych u ludzi. Pewną specyfikę międzypłciowych różnic między szybkimi i wolnymi mięśniami podkreśla dodatkowo fakt jeszcze jednej obserwacji: mianowicie, gdy dla mięśnia płaszczkowatego obliczona została liczba jego jednostek ruchowych poprzez podzielenie siły skurczu tężcowego mięśnia (średnio 1794 mN dla samców i 924 mN dla samic) przez średnią siłę skurczu tężcowego ich jednostek ruchowych (95 mN dla samców i 49 mN dla samic) (DRZYMAŁA-CELICHOWSKA i KRUTKI 2015), okazało się, że badany mięsień składa się z 19 jednostek ruchowych, bez różnic międzypłciowych, widocznych w szybkim mięśniu brzuchatym łydki.

Wykryte różnice w liczbie jednostek ruchowych wiążą się z różnicami struktural-

nymi w obrębie OUN, w rdzeniu kręgowym. Wiadomo, że ośrodkowy układ nerwowy ma cechy dymorficzne; masa mózgu wynosi u mężczyzn przeciętnie 1375 g, podczas gdy u kobiet 1225 g (12% różnicy). Zbliżone wyniki zaobserwowaliśmy dla zwierząt doświadczalnych (szczurów rasy Wistar), u których masa mózgowia wynosiła u samców 2,85 g, a u samic 2,44 g (16% różnicy) (MIERZEJEWSKA-KRZYŻOWSKA i współaut. 2014). Na tym modelu zwierzęcym przeprowadziliśmy badania neuroanatomiczne, w których wybarwialiśmy motoneurony mięśnia brzuchatego łydki w roztworze peroksydazy chrzanowej (HRP), która jest wchłaniana przez włókna nerwowe i następnie transportowana w aksonach wzdłuż nerwu do rdzenia kręgowego, gdzie wypełnia motoneurony, pozwalając policzyć motoneurony i ocenić ich wielkość. Obie cechy okazały się zróżnicowane płciowo. Przede wszystkim okazało się, że mięsień brzuchaty łydki samców unerwiany jest średnio przez 95 motoneuronów, a u samic przez 84. Trzeba uzupełnić, że wśród tych neuronów są duże motoneurony (tzw. α -motoneurony), które tworzą wraz z unerwianymi przez nie włóknami mięśniowych jednostki ruchowe oraz znacznie od nich mniejsze (tzw. γ -motoneurony), które unerwiają bardzo ważne receptory mięśniowe nazywane wrzecionami mięśniowymi. Gdy więc motoneurony zostały podzielone na te dwie kategorie, ostatecznie u samców przeciętnie było 66 α -motoneuronów, a u samic 56 (różnica około 17%). Są to wartości wyższe niż wspomniany wcześniej wynik oszacowania oparty o porównanie sił skurczu mięśnia i jednostek ruchowych (czyli 57 i 52 jednostki odpowiednio dla samców i samic). Różnica ta nie była dla nas zaskakująca z dwóch powodów. Po pierwsze wiemy, że w miarę wzrostu liczby czynnych jednostek ruchowych skuteczność sumowania ich sił skurczu maleje, czyli dla uzyskania określonej siły trzeba więcej jednostek ruchowych, niż wynikałoby to z prostego sumowania ich indywidualnych sił (DRZYMAŁA-CELICHOWSKA i współaut. 2010, 2016): w odniesieniu do szacowania liczby jednostek ruchowych zjawisko to prowadzi do zaniżenia wyniku. Z drugiej strony, motoneurony w badaniach histologicznych były liczone w skrawkach rdzenia kręgowego. Możliwe jest, że niektóre komórki przecięte w połowie znajdowały się po części w obu skrawkach, co może prowadzić do zawyżenia wyniku. Druga część obserwacji (pomiar wielkości motoneuronów) pozwoliła udowodnić, że α -motoneurony samców są istotnie większe niż samic. Ten wynik sugeruje różnice czynnościowe tych neuronów (niezbadane jeszcze), gdyż z wielkością neuronów wiąże się szereg cech elek-

trofizjologicznych, m.in. pobudliwość. Obie omawiane obserwacje, odnoszące się większej liczby neuronów oraz ich większych rozmiarów u samców, wiązać należy przede wszystkim z większą masą ośrodkowego układu nerwowego.

Mięsień brzuchaty łydki szczura unerwiony jest przede wszystkim przez neurony zlokalizowane w piątym segmencie lędźwiowym rdzenia kręgowego, ale też w mniejszym stopniu przez neurony z segmentów czwartego albo szóstego lędźwiowego (TABOROWSKA i współaut. 2016). Zastosowana technika barwienia motoneuronów umożliwiła dodatkową analizę rozłożenia motoneuronów w rdzeniu kręgowym. Neurony te skupione są wzdłuż rdzenia kręgowego w postaci kolumny, nazywanej jądrem ruchowym. Rozmiary tego jądra ruchowego oraz gęstość komórek w jego obszarze okazały się również wyraźnie zróżnicowane w zależności od płci. Mianowicie, jądro ruchowe było dłuższe o około 32% u samców, ale u samic neurony rozłożone były z większą gęstością (MIERZEJEWSKA-KRZYŻOWSKA i współaut. 2019). Trudno jest wyraźnie wskazać już teraz znaczenie tej obserwacji, ale podkreśla ona, że międzypłciowe różnice dotyczą także takich szczegółów budowy anatomicznej, która w przypadku OUN zwykle powiązana jest z jego czynnością.

Wrzeciona mięśniowe to receptory, których informacje czuciowe pozwalają na kontrolowanie położenia ciała w przestrzeni (dzięki temu można z zamkniętymi oczami trafić palcem w czubek nosa). Duża gęstość wrzecion mięśniowych cechuje mięśnie odpowiedzialne za precyzyjne ruchy, np. mięśnie poruszające gałką oczną. Mniejsza gęstość tych receptorów w mięśniach osobników męskich może być elementem wyjaśniającym gorszą precyzję kontroli pozycji stawów u mężczyzn (VAFADAR i współaut. 2015), czy też różnice charakteru pisma. Doświadczenia z barwieniem motoneuronów zwróciły uwagę na jeszcze jeden aspekt różnic płciowych związany z mięśniami szkieletowymi. Jak wyżej wspomniano, barwienie wykazało, że γ -motoneurony unerwiające wrzeciona mięśniowe występują u samców i samic w zbliżonej liczbie (MIERZEJEWSKA-KRZYŻOWSKA i współaut. 2014). Ta obserwacja zasugerowała, że można oczekiwać zbliżonej liczby tych receptorów w mięśniach zwierząt obu płci. Hipoteza ta znalazła poparcie w wynikach aktualnie prowadzonych badań, które wskazują, że w badanym mięśniu występuje niezależnie od płci około 13 receptorów, ale ze względu na znaczącą różnicę masy samego mięśnia (większą u samców) gęstość tych receptorów jest w przybliżeniu półtora razy większa w mięśniach samic (CELICHOWSKI i współaut. 2019).

Zapewne nie wszystkie procesy prowadzące do takich różnic płciowych zostały całkowicie wyjaśnione. Jednak wiadomo, że wpływ na różnice zawartości szybkich miozyn ma przede wszystkim testosteron oddziałujący w trakcie rozwoju ciała, gdyż kastracja młodych samców blokuje rozwój proporcji miozyn typowych dla osobników męskich (EASON i współaut. 2000), a podawanie testosteronu nawet kilka miesięcy po kastracji powoduje wzrost zawartości miozyny typu IIa, w proporcji zbliżonej jak u normalnych samców (ENGLISH i SCHWARTZ 2002).

Podsumowując wszystkie obserwacje można stwierdzić, że cechy mięśni szkieletowych są w bardzo znaczącym stopniu zróżnicowane w zależności od płci, a dotyczy to zdecydowanej większości cech morfometrycznych, histologicznych oraz fizjologicznych włókien mięśniowych, cech skurczu jednostek ruchowych, a także neuronów unerwiających mięśnie. Coraz pełniejsze zrozumienie różnic międzypłciowych w budowie i czynnościach mięśni dostarcza podstawowej wiedzy o pracy mięśni, merytorycznych argumentów wyjaśniających, dlaczego nie może być wspólnych zawodów sportowców obu płci, a w retrospektywnej dyskusji pozwalających na spojrzenie z innej perspektywy na przypadki takie, jak historia sukcesów sportowych Stanisławy Walasiewicz.

Streszczenie

Artykuł przedstawia bieżący stan wiedzy o różnicach międzypłciowych cech skurczu jednostek ruchowych, unerwienia ruchowego i czuciowego mięśni szkieletowych, cech neuronów motorycznych, proporcji białek kurczliwych i włókien mięśniowych różnych typów oraz cech morfometrycznych mięśni i włókien mięśniowych. Badania te prowadzone na zwierzętach na poziomie komórkowym, pozwalają wyjaśniać podstawy istotnych różnic uwarunkowań motorycznych kobiet i mężczyzn.

LITERATURA

- BROOKE M. H., KAISER K. K., 1970. *Muscle fibre types: how many and what kind?* Arch. Neurol. Chicago 23, 369-379.
- BURKE R. E., 1981. *Motor units: anatomy, physiology and functional organization*. [W:] *APS Handbook of Physiology Series, Section 1, The Nervous System, Vol. 11, part 1, Motor Control*. BROOKS V. B. (red.). Bethesda, MD, American Physiological Society, 345-422.
- BURKE R. E., LEVINE D. N., TSAIRIS P., ZAJAC F. E., 1973. *Physiological types and histochemical profiles in motor units of the cat gastrocnemius*. J. Physiol. 234, 723-748.
- CELICHOWSKI J., DRZYMAŁA H., 2006. *Differences between male and female motor unit properties of the medial gastrocnemius muscle in rat*. J. Physiol. Pharmacol. 57, 83-93.
- CELICHOWSKI J., DRZYMAŁA-CELICHOWSKA H., 2007. *The number of motor units in the medial gastrocnemius muscle of male and female rats*. J. Physiol. Pharmacol. 58, 821-828.

- CELICHOWSKI J., GARTYCH M., BUKOWSKA D., MIERZEJEWSKA-KRZYŻOWSKA B. 2019. *The number and motor innervation of muscle spindles in the medial gastrocnemius of male and female rats*. *Acta Neurobiol. Exp.* 79, 1-99.
- DRZYMAŁA-CELICHOWSKA H., KRUTKI P., 2015. *Slow motor units in female rat soleus are slower and weaker than their male counterparts*. *J. Muscle Res. Cell Motil.* 36, 287-295.
- DRZYMAŁA-CELICHOWSKA H., KRUTKI P., CELICHOWSKI J., 2010. *Summation of motor unit forces in the rat medial gastrocnemius muscle*. *J. Electromyogr. Kinesiol.* 20, 599-607.
- DRZYMAŁA-CELICHOWSKA H., KAROLCZAK J., REDOWICZ M. J., BUKOWSKA D., 2012. *The content of myosin heavy chains in hindlimb muscles of female and male rats*. *J. Physiol. Pharmacol.* 63, 187-193.
- DRZYMAŁA-CELICHOWSKA H., RAIKOVA R., KRUTKI P., 2015. *Decomposition of motor unit tetanic contractions of rat soleus muscle: Differences between males and females*. *J. Biomech.* 48, 3097-3102.
- DRZYMAŁA-CELICHOWSKA H., KACZMAREK P., KRUTKI P., CELICHOWSKI J., 2016. *Summation of slow motor unit forces at constant and variable interpulse intervals in rat soleus muscle*. *J. Electromyogr. Kinesiol.* 30, 1-8.
- EASON J. M., SCHWARTZ G., SHIRLEY K. A., ENGLISH A. W., 2000. *Investigation of sexual dimorphism in the rabbit masseter muscle showing different effects of androgen deprivation in adult and young animals*. *Arch. Oral Biol.* 45, 683-690.
- ENGLISH A. SCHWARTZ W., G., 2002. *Development of sex differences in the rabbit masseter is not restricted to a critical period*. *J. Appl. Physiol.* 92, 1214-1222.
- ENGLISH A. W., WIDMER CH. G., 2003. *Sex differences in rabbit masseter muscle function*. *Cells Tiss. Organs* 174, 87-96.
- ENGLISH A. W., EASON J., SCHWARTZ G., SHIRLEY A., 1999. *Sexual dimorphism in the rabbit masseter muscle: myosin heavy chain composition of neuromuscular compartments*. *Cells Tiss. Organs* 164, 179-191.
- HENNEMAN E., SOMJEN G., CARPENTER D. O., 1965. *Functional significance of cell size in spinal motoneurons*. *J. Neurophysiol.* 28, 560-580.
- HICKS A. L., KENT-BRAUN J., DITOR D. S., 2001. *Sex differences in human skeletal muscle fatigue*. *Exerc. Sport Sci. Rev.* 29, 109-112.
- KALRA C., KUMAR D. K., ARJUNAN S., 2012. *Age and gender related differences in surface electromyograms for various force levels of contraction*. *J. Med. Biol. Eng.* 32, 405-410.
- KERNELL D., EERBEEK O., VERHEY B. A., 1983. *Relation between isometric force and stimulus rate in cat's hindlimb motor units of different twitch contraction time*. *Exp. Brain Res.* 50, 220-227.
- MEDLER S., 2019. *Mixing it up: the biological significance of hybrid skeletal muscle fibers*. *J. o Exp. Biol.* 222, doi: 10.1242/jeb.200832.
- MIERZEJEWSKA-KRZYŻOWSKA B., DRZYMAŁA-CELICHOWSKA H., CELICHOWSKI J., 2011. *Gender differences in the morphometric properties of muscle fibers and the innervation ratio of motor units in the rat medial gastrocnemius muscle*. *Anat. Histol. Embryol.* 40, 249-255.
- MIERZEJEWSKA-KRZYŻOWSKA B., DRZYMAŁA-CELICHOWSKA H., BUKOWSKA D., CELICHOWSKI J., 2012. *Sex differences in morphometric properties of muscle fibers measured on a cross-sections of rat hindlimb muscles*. *Anat. Histol. Embryol.* 41, 122-129.
- MIERZEJEWSKA-KRZYŻOWSKA B., BUKOWSKA D., TABOROWSKA M., CELICHOWSKI J., 2014. *Sex differences in the number and size of motoneurons innervating rat medial gastrocnemius muscle*. *Anat. Histol. Embryol.* 43, 182-189.
- MIERZEJEWSKA-KRZYŻOWSKA B., BUKOWSKA D., CELICHOWSKI J., 2019. *The differences in the structure of the motor nucleus of the medial gastrocnemius muscle in male and female rats*. *Ann. Anat.* 221, 93-100.
- ROBERTS B. M., NUCKOLS G., KRIEGER J. W., 2020. *Sex differences in resistance training: a systematic review and meta-analysis*. *J. Strength Conditi. Res.* 34, 1448-1460.
- TABOROWSKA M., BUKOWSKA D., DRZYMAŁA-CELICHOWSKA H., MIERZEJEWSKA-KRZYŻOWSKA B., CELICHOWSKI J., 2016. *Morphometric properties and innervation of muscle compartments in rat medial gastrocnemius*. *Somatosens. Motor Res.* 33, 200-208.
- VAFADAR A. K., CÔTÉ J. N., ARCHAMBAULT P. S., 2015. *Sex difference in the shoulder joint position sense acuity: a cross-sectional study*. *BMC Musculoskel. Dis.* 12, 1-7.

KOSMOS Vol. 69, 4, 663–672, 2020HANNA DRZYMAŁA-CELICHOWSKA^{1,2}, JAN CELICHOWSKI²¹*Department of Biochemistry,* ²*Department of Neurobiology, Poznan University of Physical Education, 27/39 Królowej Jadwigi Str., 61-871 Poznań, e-mail: drzymala@awf.poznan.pl, celichowski@awf.poznan.pl*

ARE CONTRACTILE PROPERTIES OF SKELETAL MUSCLES SEX DEPENDENT?

Summary

The article presents the current state of knowledge on the differences between the sexes in the contraction features of motor units, motor and sensory innervation of skeletal muscles, features of motor neurons, proportions of contractile proteins and muscle fibers of various types, and morphometric features of muscles and muscle fibers. These studies, conducted at the cellular level, on animals, allow to explain the foundations of significant differences in the motor conditions of women and men.

Key words: motoneurons, motor units, muscle fibers, muscle spindles, skeletal muscles, sex differences

Hanna Drzymała-Celichowska ukończyła studia na Akademii Rolniczej w Poznaniu, doktorat obroniła w Instytucie Biologii Doświadczalnej im. M. Nenckiego PAN w Warszawie, a habilitację otrzymała na Wydziale Biologii Uniwersytetu Jagiellońskiego. Jej badania dotyczą głównie zmienności cech skurczu jednostek ruchowych i elektrofizjologicznych cech motoneuronów. Jest autorką 28 publikacji indeksowanych przez Web of Science.

Jan Celichowski ukończył studia na Akademii Rolniczej w Poznaniu, doktorat, habilitację i tytuł profesora nauk biologicznych uzyskał w Instytucie Biologii Doświadczalnej im. M. Nenckiego PAN w Warszawie. Jest autorem 116 publikacji indeksowanych przez Web of Science, kierował 9 grantami badawczymi dotyczącymi przede wszystkim plastyczności i zmienności jednostek ruchowych mięśni szkieletowych. Aktualnie pełni funkcję prorektora ds. nauki AWF w Poznaniu, na której kieruje również Zakładem Neurobiologii. Pełnił funkcję prezesa Polskiego Towarzystwa Badań Układu Nerwowego w latach 2017-2019.