

Zielona Góra dn. 25 czerwca 2023 r.

Prof. dr hab. Agnieszka Zembroń-Łacny  
Katedra Fizjologii Stosowanej i Klinicznej  
Collegium Medicum Uniwersytet Zielonogórski  
ul. Zyty 28, 65-046 Zielona Góra  
[a.zembron-lacny@cm.uz.zgora.pl](mailto:a.zembron-lacny@cm.uz.zgora.pl)

**Recenzja pracy doktorskiej mgr Marty Bazańskiej-Janas  
wykonanej w Akademii Wychowania Fizycznego  
im. Bronisława Czecha w Krakowie**

**WPLYW HIPOKSJI NORMOBARYCZNEJ NA PRÓG PRZEMIAN BEZTLENOWYCH  
I STAN MAKSYMALNEJ RÓWNOWAGI MLECZANOWEJ U KOLARZY GÓRSKICH**

Uogólniona hipoksja jest od lat stosowana w treningu sportowym jako trening wysokogórski lub wysokościowy (*altitude training*), w celu zwiększenia wytrzymałości i szybkości. W obszernej meta-analizie Bonetti i Hopkins [Sports Med 2009] wykazali, że klasyczny model treningu hipoksyjnego z zastosowaniem protokołu LHTL (*live-high train-low*) poprawia wydajność pracy zarówno sportowców *elite*, jak i *subelite* dyscyplin wytrzymałościowych, podczas gdy długa ciągła ekspozycja lub ekspozycja przerywana poprawiają wydajność ćwiczeń wytrzymałościowych wyłącznie u *subelite* sportowców. W przypadku hipoksji w warunkach naturalnych mogą być stosowane dwa protokoły LHTH (czas hipoksji 24 godziny na dobę i wysoka intensywność treningu) lub LHTL (czas hipoksji 24 godziny na dobę i niska intensywność treningu). Dotychczas ustalono, że protokół LHTL (czas pobytu na wysokości od 2-4 tygodni) pozwala na uzyskanie nawet 50% poprawy wyników sportowych, po zakończeniu treningu sportowego w górach i zejściu na niższe wysokości. Ponadto wykazano, że po zejściu z wysokości maksimum zdolności wysiłkowej przypada na 18-20 dzień [Wilber i wsp. Med Sci Sport Exerc 2007, Sinex & Chapman J Sport Health Sci 2015].

Obecnie, w sporcie wyczynowym jest stosowana ekspozycja na hipoksję metodą przerywaną (*intermittent hypoxic exposition*, IHE) o różnym czasie naprzemiennej ekspozycji zawodników na wysokie niedotlenienie ( $FiO_2= 10,9-14,8\%$ ) i normoksję ( $FiO_2=19,8-20,9\%$ ). IHE może być stosowany wg różnych protokołów: długa ciągła LHTL (*live high train low*) ekspozycja na hipoksję 8-18 godzin dziennie, krótka ciągła LHTL ekspozycja na hipoksję 1,5-5,0 godzin dziennie, krótka przerywana LHTL ekspozycja na hipoksję 0,5-1,5 godziny dziennie, LLTH (*live low train high*) ekspozycja na hipoksję 0,2-2,0 godzin dziennie [Sinex & Chapman J Sport Health Sci 2015].

Dotychczas przeprowadzone badania pokazały, że IHE prowadzony w spoczynku lub podczas treningu fizycznego, istotnie wpływa na wytrzymałość i wydolność beztlenową oraz przyczynia się do szybszej adaptacji do niskich i umiarkowanych wysokości (2000-3000 m n.p.m.) [Hinckson i wsp. 2007, Hamlin i Hellemans

2007, Klukowski i Świącicki 2013]. Jednak nie ma jednoznacznych dowodów, który z wymienianych modeli IHE jest najbardziej optymalny, gdyż reakcja organizmu na wysiłek w warunkach hipoksji jest zróżnicowana i indywidualna [Sinex & Chapman J Sport Health Sci 2015]. Brakuje także danych dotyczących wpływu wymienionych modeli IHE „na położenie progu anaerobowego, który wykorzystywany jest powszechnie nie tylko jako wskaźnik wydolności fizycznej, ale również jako wyznacznik wykorzystywany do określania stref wysiłkowych” [Bazańska-Janaszek - praca doktorska]. Czy wyznaczenie progu anaerobowego w warunkach normoksji jest wiarygodne w indywidualnym ustaleniu stref treningowych w warunkach hipoksji? Autorka podjęła próbę ustalenia związku wartości progu anaerobowego w różnych warunkach środowiska (normoksja vs. hipoksja normobaryczna) i rekomendowanych obciążeń treningowych z efektywnością treningu wysokościowego.

Praca doktorska przedstawiona do recenzji została zrealizowana w Akademii Wychowania Fizycznego im. Bronisława Czecha w Krakowie, ma objętość 95 stron, posiada typowy układ stosowany w rozprawach doktorskich z podziałem na: wstęp/wprowadzenie, cel pracy i pytania /hipotezy badawcze, materiał i metody, wyniki badań, dyskusja i wnioski oraz streszczenie w wersji polskiej i angielskiej. W strukturze pracy prowadzono sekcję - ograniczenie badań. W tekście pracy znajduje się 15 tabel i 34 ryciny. Piśmiennictwo obejmuje ponad 100 pozycji. Projekt uzyskał pozytywną opinię Komisji Bioetyki przy Medycznej Wyższej Szkole Zawodowej w Opolu (**brak numeru zgody/opinii KB**). **Brak informacji o źródle finansowania badań – proszę o wyjaśnienie w trakcie obrony.**

We wprowadzeniu, Autorka opisuje podstawowe wskaźniki wydolności fizycznej, metody wyznaczania progu przemian beztlenowych i stref treningowych oraz wpływu hipoksji na wysiłek fizyczny. Zwraca uwagę, że trening fizyczny realizowany w warunkach hipoksji (hipobarycznej lub normobarycznej) zwiększa stężenie erytropoetyny (EPO), co skutkuje wzrostem stężenia hemoglobiny i masy erytrocytarnej, tym samym wzrostem hematokrytu krwi. We współczesnym sporcie coraz bardziej wyrafinowane kontrole antydopingowe pozostawiają elitarnym sportowcom niewielki wybór legalnych środków ergogenicznych, które mogą znacznie poprawić wyniki. Sztuczna hipoksja i efekty ergogeniczne są alternatywa dla metod i technik niedozwolonych w sporcie, co wzbudza dyskusje wśród ekspertów WADA [Saugy i wsp. Front Sports Act Living 2022]. Wartości referencyjne dla EPO wynoszą 4,3–29 IU/L (oczywiście mogą się różnić w zależności od laboratorium). Saugy i wsp. [Front Sports Act Living 2022] na podstawie przeglądu literatury przedstawił wysoką korelację ( $R^2 = 0.605$ ,  $r = 0.778$ ,  $p < 0.001$ ) między dawką hipoksji a stężeniem hemoglobiny. **Czy trening sportowy w warunkach hipoksji stwarza ryzyko przekroczenia wartości referencyjnych dla EPO i wykluczenia sportowca z udziału w zawodach? W jakich protokołach hipoksyjnych spotkała się pani z najwyższymi wartościami stężenia EPO, liczby retikulocytów i/lub stężenia hemoglobiny? Jak przebiega aktualnie monitorowanie zmian wskaźników hematologicznych u sportowców i jakie wskaźniki hematologiczne są brane pod uwagę w badaniach antydopingowych?** We wprowadzeniu znajduje się tabela 1 - bardzo dobrze podsumowująca odpowiedź organizmu na hipoksję (procesy, układy, wskaźniki

fizjologiczne). Niektóre informacje są niezmiennie – wskazuje na to m.in. rok cytowanej przez Autorkę literatury, ale niektóre wymagają weryfikacji - dotyczy to wpływu hipoksji na układ immunologiczny i ryzyka infekcji górnych dróg oddechowych po zakończeniu ekspozycji na hipoksję i wysiłek fizyczny. **Bardzo proszę o wyjaśnienie, opierając się na literaturze z ostatnich 10 lat, wpływu hipoksji (hipobarycznej lub normobarycznej) na odpowiedź zapalną i immunologiczną. W tabeli brak informacji nt. układu pokarmowego. Zatem proszę o wyjaśnienie wpływu hipoksji na funkcje układu pokarmowego, dla którego już bardzo dużym obciążeniem wyłącznie wyścig kolarski (np. Tours de France 2023, etap 15-17: Saint-Gervais Mont Blanc, wspinaczka do 4300 m n.p.m).**

W rozdziale - Cel badań, Autorka przedstawiła problem badawczy eksponując cel badań „...*analiza wpływu hipoksji normobarycznej o różnym natężeniu na próg przemian anaerobowych i stan maksymalnej równowagi mleczanowej u kolarzy górskich.*” Następnie przedstawiła siedem bardzo dobrze zredagowanych pytań badawczych – w treści identycznych jak hipotezy, różniących się jedynie formą gramatyczną. **Co skłoniło Autorkę do powielania treści w formie pytań i hipotez badawczych?**

W rozdziale - Materiał i metody badań - Autorka opisuje proces rekrutacji i randomizacji 16 kolarzy, z charakterystyką badanych osób w formie tabeli 2. Zawodnicy zostali zakwalifikowani do badań przez lekarza ze specjalizacją z medycyny sportowej, z zaświadczeniem o braku przeciwwskazań do wykonywania intensywnych wysiłków fizycznych w warunkach normoksji i hipoksji normobarycznej. Po wykonaniu standardowych pomiarów antropometrycznych, zawodników poddano próbie wysiłkowej - *cardio-pulmonary exercise test* CPET - w warunkach normoksji, schemat protokołu wysiłkowego przedstawiono w tabeli 4. Następnie po trzech dniach odpoczynku, zawodników poddano serii wysiłków ze stałym obciążeniem w celu wyznaczenia *maximal lactate steady state* MLSS - w warunkach normoksji ( $FiO_2=20,95\%$ ). W kolejnych dniach zawodników poddano próbom wysiłkowym CPET i MLSS w warunkach hipoksji normobarycznej przy różnej zawartości tlenu w atmosferze pomieszczenia tj.  $FiO_2=16\%$  (odpowiada wysokości  $\sim 2000$  m n.p.m.) i  $FiO_2=14,5\%$  (odpowiada wysokości  $\sim 3000$  m n.p.m.), prowadząc ciągłą rejestrację wskaźników krążeniowo-oddechowych. Bardzo dobry opis metod statystycznych.

Rozdział - Wyniki badań - obejmuje analizę zmian wskaźników fizjologicznych przedstawionych w 11 tabelach i na 27 rycinach. **Opis został zredagowany schematycznie, odnosząc się do opisu narzędzi statystycznych lub pytań badawczych, co skutkuje małą ilością informacji rzeczywiście opisujących wyniki dokonanych pomiarów.** Porównanie wartości mocy bezwzględnej (WR) i względnej (WR/kg) w warunkach hipoksji normobarycznej ( $FiO_2=16\%$  i  $FiO_2=14,5\%$ ) pokazało statystycznie istotne obniżenie WR w porównaniu do wartości ocenionej w warunkach normoksji w różnych zastosowanych metodach pomiaru (VT1, D-max, VT2 i MLSS). Stężenie mleczanu (La) podczas serii wysiłków MLSS wzrosło statystycznie istotnie w warunkach hipoksji normobarycznej ( $FiO_2=16\%$ ) w stosunku do normoksji, przy braku różnic między pomiarami w warunkach otoczenia  $FiO_2=16\%$  i  $FiO_2=14,5\%$ . Analiza wskaźników krążeniowo-oddechowych,

jak pobieranie tlenu  $VO_2$  i  $VO_2/kg$ , częstość skurczów serca HR,  $VO_2/HR$  i wentylacja minutowa płuc VE, podczas wysiłku z intensywnością MLSS pokazała istotne obniżenie wartości  $VO_2$ ,  $VO_2/HR$  i w warunkach hipoksji normobarycznej ( $FiO_2=14,5\%$ ) w porównaniu do normoksji. Rycina 20 jest powtórzeniem ryciny nr 19. Analiza korelacji Pearsona między wartością mocy względnej WR/kg (MLSS) a wskaźnikami krążeniowo-oddechowymi pokazała istotnie ( $p<0.001$ ) wysoką wartość współczynnika  $r>0.5$  dla  $VO_2max/kg$  ( $r=0,77$ ),  $VO_2/WR$  (VT1,  $r=-0,58$ ),  $VO_2$  (MLSS,  $r=0,58$ ) i  $VO_2/kg$  (MLSS,  $r=0,89$ ). **Proszę o interpretację wyliczonych wartości współczynnika korelacji Pearsona.** Porównanie wartości maksymalnej mocy bezwzględnej (WRmax) i względnej (WRmax/kg) w warunkach hipoksji normobarycznej pokazało statystycznie istotne obniżenie WRmax i WRmax/kg w porównaniu do wartości ocenionej w warunkach normoksji. Wartości maksymalnego pobierania tlenu  $VO_2max$ ,  $VO_2max/kg$ ,  $VO_2max/HR$  i wysycenie hemoglobiny tlenem  $SpO_2$  obniżyły się istotnie w warunkach hipoksji normobarycznej ( $FiO_2=16\%$  i  $FiO_2=14,5\%$ ) w porównaniu do normoksji. Wykazano także istotne różnice między  $FiO_2=16\%$  i  $FiO_2=14,5\%$ . Analiza korelacji Pearsona między  $SpO_2$  a wskaźnikami krążeniowo-oddechowymi pokazała istotne wysokie wartości współczynnika  $r>0,5$  dla WRmax, WR (VT1), WR/kg (VT1), WR (VT2) i WR/kg (VT2). **Jak wyżej - proszę o interpretację wyliczonych wartości współczynnika korelacji Pearsona. W jakim celu wykonano analizę liniową Pearsona?** Analiza wskaźników krążeniowo-oddechowych w metodach pomiaru VT1 i VT2 pokazała istotne obniżenie w warunkach hipoksji hipobarycznej ( $FiO_2=14,5\%$ ), za wyjątkiem VE/CO2 (MLSS), gdzie wykazano istotny wzrost wartości w porównaniu do warunków normoksji. Podsumowując, można stwierdzić, że bez względu na metodę pomiaru, odpowiedź układu krążenia i układu oddechowego jest wyraźnie większa przy zastosowaniu hipoksji normobarycznej z koncentracją tlenu w atmosferze pomieszczenia  $FiO_2=14,5\%$  (odpowiada wysokości  $\sim 3000$  m n.p.m.).

W rozdziale – Dyskusja - Autorka nawiązuje do warunków otoczenia/środowiska w jakich są realizowane wyścigi kolarskie i bardzo dobrze uzasadnia wykonanie projektu doktorskiego „*Dla sportowców trenujących lub rywalizujących w warunkach hipoksji hipobarycznej, jak i normobarycznej, istotne jest poznanie zmian zachodzących na obciążeniu progowym ... oraz wykorzystania tej wiedzy do programowania treningów...*”. Następnie Autorka koncentruje się na interpretacji wyników badań zachowując podział na rozdziały zgodny z kolejnością wykonanych pomiarów i wykorzystując dostępną literaturę. W rozdziale - 5.2 Dyskusji - pojawia się trafne podsumowanie „*hipoksja ma wyraźny wpływ na kinetykę zmian stężenia mleczanu we krwi i rytm oddechowy, a w czasie wysiłku fizycznego wzrost VE ... jest wynikiem pobudzenia chemoreceptorów obwodowych ... i zwiększonego udziału glikolizy beztlenowej.*” Rzeczywiście na wysokości 2000-3000 m n.p.m. (warunki prowadzonych badań) nie działa paradoks mleczanowy. Rozdział 5.2 Dyskusji kończy się nawiązaniem do badań, gdzie stosowano suplementację żywieniową [Subudhi i wsp. Med Sci Sports Exerc 2006]. **Proszę wyjaśnić w trakcie obrony, jakie suplementy żywieniowe są zalecane sportowcom podczas wysiłków w warunkach hipoksji, czyli treningu wysokogórskiego?** W kolejnym rozdziale 5.3 Dyskusji pojawiają się ciekawe podsumowania wyników wykonanego eksperymentu, w odniesieniu do literatury „*...transport  $O_2$  jest czynnikiem ograniczającym  $VO_2max$  zwłaszcza u sportowców trenujących*

wytrzymałościowo [Wagner *Respir Physiol* 2000] ... wraz ze spadkiem  $pO_2$  rośnie rola płuc w ograniczeniu  $VO_{2max}$  [Ferretti i di Prampero *Respir Physiol* 1995]. Spadek  $HR_{max}$  można uznać za czynnik ograniczający wydolność na wysokości. Jednak niższe  $HR_{max}$  związane ze zmniejszonym  $Q$  mogłoby złagodzić ograniczenie dyfuzji  $O_2$  w naczyniach włosowatych pęcherzyków płucnych, a tym samym spadek  $SpO_2$  i  $VO_{2max}$ ". Rozdział 5.4 Dyskusji rozpoczyna się od stwierdzenia, że „W dostępnej literaturze brakuje informacji dotyczących wpływu hipoksji normobarycznej o różnym natężeniu na stan równowagi mleczanowej”. Rzeczywiście, absolutnie zgadzam się z Autorką, także w przypadku *hypobaric hypoxia and maximal lactate steady state*, badań jest niewiele [Faulhaber i wsp. *Int J Environ Res Public Health* 2021, Polle i wsp. *J Physiol* 2021] i zostały wykorzystane przez Autorkę do interpretacji badań własnych. W rozdziale 5.5 Dyskusji autorka potwierdza zgodność własnych obserwacji z wynikami innych autorów dotyczące odpowiedzi fizjologicznej organizmu w zależności od intensywności wykonanego wysiłku i natężenia/dawki hipoksji. Czynnikiem determinującym aktywność metaboliczną mięśni szkieletowych i mięśnia sercowego w trakcie wysiłku jest obniżenie wysycenie hemoglobiny tlenem  $SpO_2$  w wyniku redukcji ciśnienia parcjalnego tlenu na wysokości [Rusko *Am J Sports Med.* 2004]. „ $SpO_2$  ma bezpośredni wpływ na wartość  $VO_{2max}$ , powodując, że każdy spadek  $SpO_2$  o 1% poniżej poziomu 95% przyczynia się do obniżenia pulapu tlenowego o 1-2% [Dempsey i Wagner *J Appl Physiol* 1999]. ...obniżenie  $SpO_2$  już występuje podczas wysiłków wykonywanych z niską i średnią intensywnością, nawet u bardzo dobrze wytrenowanych sportowców [Peltonen *Eur J Appl Physiol* 1999] [Bazańska-Janias - praca doktorska]. W przypadku braku zmian częstości skurczów serca HR u badanych kolarzy w warunkach hipoksji normobarycznej, Autorka wyjaśnia, że przegląd literatury nie dostarczył jednoznacznej odpowiedzi dot. kierunku zmian HR przy umiarkowanej lub dużej/ostrej hipoksji, głównie ze względu na różne warunki pomiaru w dostępnych publikacjach.

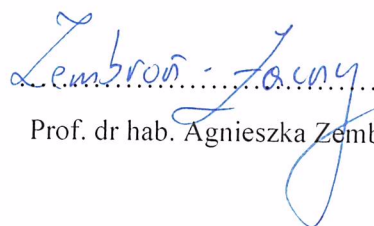
W rozdziale – Ograniczenia badania, Autorka wyjaśnia trudności jakie pojawiły się w trakcie realizacji eksperymentu oraz wskazuje kierunki badań jakie należy podjąć, aby uzyskać wiarygodne informacje na temat stosowania hipoksji normobarycznej lub hipoksji hipobarycznej w procesie treningowym w różnych dyscyplinach sportowych. Sekcja jest zgodna z aktualnym trendem stosowanym przez wiele tytułów czy wydawnictw. Brawo!

Praca podsumowana jest siedmioma wnioskami jednoznacznie powiązаныmi z wynikami badań, wnioski są odpowiedzią na postawione pytania badawcze i weryfikują sformułowane hipotezy. Wnioski są odpowiedzią na postawiony cel badań, czyli wyjaśnienie wpływu hipoksji normobarycznej na wartość progu przemian anaerobowych i stan maksymalnej równowagi mleczanowej u kolarzy górskich.

Przedstawiona mi do recenzji praca jest wykonana zgodnie z zachowaniem procedury randomizacji, opiera się na prawidłowo opisanych protokołach ekspozycji na hipoksję oraz metodach oceny wskaźników krążeniowo-oddechowych. Bardzo dobry schemat badań. Wyniki badań nie budzą wątpliwości, że wysiłek wykonywany w warunkach hipoksji normobarycznej obniża wartość mocy bezwzględnej WR i wpływa na stan

maksymalnej równowagi mleczanowej oraz wartości wskaźników krążeniowo-oddechowych. Pojawiające się niezręczności stylistyczne wynikają z niewielkiego doświadczenia publikacyjnego Doktorantki, co nie umniejsza wartości naukowej przeprowadzonych badań.

**Praca mgr Marty Bazańskiej-Janasy odpowiada wymaganiom określonym w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2022 poz. 574). Wnoszę zatem do Rady Dyscypliny Nauk o Kulturze Fizycznej o dopuszczenie Kandydatki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

  
.....  
Prof. dr hab. Agnieszka Zembroń-Lacny

Zielona Góra 25 czerwca 2023 r.