

MIŁOSZ CZUBA<sup>1</sup>, JÓZEF LANGFORT<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Zakład Kinezylogii*

*Instytut Sportu – Państwowy Instytut Badawczy  
Trylogii 2, 01-982 Warszawa*

<sup>2</sup>*Instytut Nauk o Sporcie*

*Akademia Wychowania Fizycznego im. Jerzego Kukuczki w Katowicach  
Mikołowska 72A, 40-065 Katowice*

*E-mail: milosz.czuba@insp.waw.pl  
langfort@imdik.pan.pl*

## HIPOKSJA – WYKORZYSTANIE W TRENINGU I TERAPII

### WPROWADZENIE

Obozy wysokogórskie to powszechnie stosowana metoda wykorzystująca stan hipoksji organizmu w celu poprawy skuteczności tradycyjnego treningu sportowego. Dawniej metody treningu hipoksyjnego zarezerwowane były tylko dla sportu wyczynowego. Obecnie, dzięki rozwojowi techniki, metody te stały się dostępne dla szerszej grupy odbiorców.

Hipoksja jest stanem, w którym utlenianie tkanek niektórych organów lub całego organizmu jest niewystarczające w odniesieniu do ich zapotrzebowania na tlen. Stan ten w organizmie może pojawić się z przyczyn zarówno patofizjologicznych, jak i fizjologicznych. Reakcję taką obserwujemy w wyniku fizjologicznej odpowiedzi na obniżenie się ciśnienia barometrycznego, w następstwie czego dochodzi do redukcji ciśnienia parcjalnego tlenu we krwi, a w dalszej konsekwencji, do obniżenia wysycenia hemoglobiny tlenem. Taką odpowiedź ze strony organizmu obserwujemy w warunkach wysokogórskich – zazwyczaj po przekroczeniu 2000 m n.p.m., gdzie w wyniku obniżenia ciśnienia barometrycznego dochodzi do redukcji transportu O<sub>2</sub> do tkanek i stanu hipoksji. W warunkach nizinnych możliwa jest symulacja podobnych warunków w komorach hipobarycznych (ciśnieniowych). Innym sposobem wywołania stanu hipoksji w organizmie jest zastosowanie normobarycznych pomieszczeń hipoksyjnych, w których, zamiast ciśnienia barometrycznego, zmianie ulega procentowa

zawartość tlenu w powietrzu. Obniżanie procentowego udziału O<sub>2</sub> w mieszance oddechowej odbywa się przez zastąpienie go zwiększonym stężeniem azotu, który jest neutralny dla organizmu człowieka.

Początkowo badania dotyczące wpływu hipoksji na organizm człowieka ograniczały się do zastosowań w dziedzinie wojskowości, medycyny lotniczej i kosmicznej, a także treningu sportowego. W ostatnich latach dużo uwagi poświęca się koncepcji wykorzystania środowiska hipoksyjnego jako środka terapeutycznego w celu wspomagania leczenia i profilaktyki przewlekłych chorób niezakaźnych oraz poprawy jakości życia pacjentów i osób starszych (MILLET i współaut. 2016). Ekspozycja organizmu na warunki hipoksji, zarówno w spoczynku, jak i w połączeniu z wysiłkiem fizycznym, przyczynia się do uruchomienia w organizmie licznych mechanizmów przystosowawczych. Zmiany te zwiększają skuteczność tradycyjnych metod treningowych i terapeutycznych. Głównym regulatorem przebiegu adaptacji do stanu hipoksji jest transkrypcyjny czynnik indukowany niedotlenieniem (ang. hypoxia inducible factor, HIF). Warto wspomnieć, że za ponad 30-letnie badania HIF, Gregg L. Semenza, Peter J. Ratcliffe i William G. Kaelin uzyskali w 2019 r. Nagrodę Nobla w dziedzinie fizjologii lub medycyny. Czynnikiem ten uważany jest za aktywator ponad 100 genów w organizmie człowieka (KE i COSTA 2006), stąd szeroki zakres zastosowania śro-

dowiska hipoksycznego jako środka ergogenicznego i terapeutycznego.

### WYKORZYSTANIE STANU HIPOKSJI W SPORCIE

Wykorzystanie zjawiska hipoksji w sporcie jest powszechnie praktykowane w celu poprawy możliwości wysiłkowych sportowców. Przez wiele lat głównym celem treningu w warunkach hipoksji była poprawa wydolności tlenowej i wytrzymałości sportowców w normoksji lub aklimatyzacja organizmu przed zawodami rozgrywanymi na wysokości, głównie za sprawą nasilenia erytropoetyzy. Jak wspomniano wcześniej, początkowo do tego celu wykorzystywano wyłącznie warunki naturalne, a trening realizowany był podczas zgrupowań wysokogórskich, najczęściej na poziomie 1500-2500 m n.p.m. Metoda ta przyjęła nazwę „mieszkaj wysoko - trenuj wysoko” (ang. live high - train high, LH-TH). Procedura LH-TH przyczynia się do wzrostu pojemności tlenowej krwi, w wyniku wzrostu stężenia hemoglobiny i liczby czerwonych krwinek (PŁOSZCZYCA i współaut. 2018). Należy zaznaczyć, że czynnikiem limitującym skuteczność tej metody w poprawie możliwości wysiłkowych w normoksji jest problem z utrzymaniem wysokiej intensywności treningowej podczas pobytu na wysokości, co w konsekwencji prowadzić może do utraty formy sportowej (WILBER i współaut. 2007). Pod koniec lat 90. XX w. LEVINE i STRAY-GUNDERSEN (1997) zaproponowali przełomową modyfikację tej metody, eliminując jej ograniczenia. Nowa metoda, nazwana „mieszkaj wysoko - trenuj nisko” (ang. live high - train low, LH-TL) zakłada pobyt sportowca na umiarkowanej wysokości (2000-3000 m n.p.m.) w celu aklimatyzacji i poprawy pojemności tlenowej krwi, oraz realizację treningu poniżej wysokości 1200 m n.p.m. w celu utrzymania jego wysokiej intensywności. Takie rozwiązanie zapobiega redukcji obciążeń treningowych, mających miejsce w metodzie LH-TH. Na przestrzeni lat rezultaty badań naukowych wielokrotnie potwierdziły skuteczność procedury LH-TL w poprawie pojemności tlenowej krwi (PŁOSZCZYCA i współaut. 2018) oraz zwiększeniu pułapu tlenowego i możliwości wysiłkowych sportowców (CZUBA i współaut. 2011, 2018).

Dalsze poszukiwania w zakresie wykorzystania hipoksji w treningu sportowym doprowadziły do powstania kolejnej koncepcji nazwanej „treningiem przerywanej hipoksji” (ang. intermittent hypoxic training, IHT). Trening IHT opierał się na założeniu, że stres wywołany działaniem hipoksji, połączony ze stresem treningowym, przyczynia się do wywołania większych zmian adaptacyjnych w

organizmie, niż trening realizowany w normoksji (WOLSKI i współaut. 1996). W metodzie IHT sportowcy w ciągu dnia przebywają w warunkach normoksji, natomiast wybrane jednostki treningowe odbywają w warunkach hipoksji. W praktyce, trening IHT realizowany jest najczęściej z wykorzystaniem normobarycznych pomieszczeń hipoksycznych, w których możliwe jest symulowanie warunków wysokogórskich w bardzo szerokim zakresie (nawet do 8000 m n.p.m.).

Wyniki badań wskazują, że procedura IHT przyczynia się do wywołania korzystnych centralnych i obwodowych zmian adaptacyjnych prowadzących do poprawy możliwości wysiłkowych. Poprawa możliwości wysiłkowych pod wpływem IHT zachodzi głównie poprzez wzrost kapilaryzacji włókien mięśniowych, poprawę zdolności buforowych tkanki mięśniowej, wzrost aktywności enzymów glikolitycznych oraz obniżenie kosztu energetycznego wysiłku (VOGT i współaut. 2001, DUFOUR i współaut. 2006, ZOLL i współaut. 2006, CZUBA i współaut. 2011, CZUBA 2013). Istotny jest również fakt, że zastosowanie treningu IHT nie ogranicza się tylko do poprawy możliwości wysiłkowych w konkurencjach wytrzymałościowych, ale także, jak dowodzą badania z ostatnich lat, do poprawy wyników sportowych w dyscyplinach szybkościowo-siłowych (CZUBA i współaut. 2017, GIRARD i współaut. 2017). Ponadto, najnowsze badania wykazują pozytywny wpływ treningu w hipoksji na możliwości strzeleckie (CZUBA i współaut. 2019) i funkcje poznawcze (SCHEGA i współaut. 2016), co, oprócz korzyści wynikających z poprawy wydolności fizycznej, może przemawiać za wykorzystaniem hipoksji w treningu służb mundurowych.

### TRENING HIPOKSYCZNY JAKO FORMA AKLIMATYZACJI PRZED WYPRAWAMI WYSOKOGÓRSKIMI

Wyprawy wysokogórskie wiążą się z narażeniem uczestników na wystąpienie choroby wysokościowej, której skutki są niebezpieczne dla ich zdrowia i życia. Podkreślić należy, że ryzyko wystąpienia choroby wysokościowej nie dotyczy tylko alpinistów uprawiających wspinaczkę na ekstremalnych wysokościach, ale także turystów korzystających z coraz szerszej oferty trekkingów wysokogórskich. Choroba wysokościowa może rozwinąć się już w okolicach wysokości 2500 m n.p.m., natomiast u osób wrażliwych objawy mogą wystąpić nawet poniżej 2000 m n.p.m. W obrębie choroby wysokościowej wyróżnia się trzy jednostki chorobowe: ostrą chorobę wysokogórską (ang. acute mountain sickness, AMS), wy-

sokościowy obrzęk płuc (ang. high-altitude pulmonary edema, HAPE) i wysokościowy obrzęk mózgu (ang. high-altitude cerebral edema, HACE). Podstawowym sposobem profilaktyki choroby wysokościowej jest prawidłowo przeprowadzona aklimatyzacja, polegająca na stopniowym i rozłożonym w czasie zwiększaniu wysokości w celu uzyskania w organizmie adaptacji do panujących warunków. Prewencyjnym działaniem jest również wprowadzenie przed planowaną wyprawą systematycznego ciągłego pobytu w spoczynku lub/i treningu w warunkach hipoksji (MILLET i JORNET 2019). Takie postępowanie umożliwia szybszą aklimatyzację do pobytu na dużych wysokościach, chroniąc w ten sposób zdrowie i życie alpinistów i turystów.

#### HIPOKSJA W PREWENCJI I TERAPII PRZEWLEKŁYCH CHOROÓB NIEZAKAŻNYCH (TZW. CHOROÓB CYWILIZACYJNYCH)

Rozwój cywilizacyjny i mało aktywny styl życia prowadzą do szerzenia się w społeczeństwie tzw. przewlekłych chorób niezakaźnych, skutkujących upośledzeniem funkcji narządów i procesów ustrojowych. Konsekwencją tego stanu rzeczy jest pogarszanie się jakości życia, niepełnosprawność, a także przedwczesne zgony. Wyniki badań jednoznacznie wskazują, że aktywność fizyczna ma silne działanie prewencyjne w odniesieniu do przewlekłych chorób niezakaźnych (MILLET i współaut. 2016). Ponadto dowiedziono, że aktywność fizyczna wykonywana zwłaszcza w warunkach hipoksji w znacznym stopniu zwiększa skuteczność działań prewencyjnych i terapeutycznych (MILLET i współaut. 2016, GUNER i współaut. 2013, MARTINEZ-GUARDADO i współaut. 2019).

#### HIPOKSJA W PROFILAKTYCE I WSPOMAGANIU LECZENIA OTYŁOŚCI

Nadmierny przyrost tkanki tłuszczowej niekorzystnie wpływa na stan zdrowia i jakość życia, w krótkim czasie doprowadza do rozwoju chorób takich jak: cukrzyca, choroby układu krążenia czy nadciśnienie tętnicze. Umiarkowany wysiłek fizyczny (tlenowy) wspomaga redukcję tkanki tłuszczowej w organizmie, jednak jest to długotrwały proces ze względu na słabe ukrwienie tkanki tłuszczowej. Z kolei, trening wytrzymałościowy prowadzony w warunkach hipoksji wpływa na wzrost aktywności czynnika wzrostu śródbłonna naczyniowego (VOGT i współaut. 2001, BROCHERIE i współaut. 2018), co prowadzi do rozbudowy

sieci naczyń krwionośnych. Pozwala to na lepsze utlenowanie tkanki tłuszczowej, nasilenie procesu lipolizy (rozkładu trójglicerydów) i szybszą redukcję tej tkanki (LIZAMORE i HAMLIN 2017, PARK i LIM 2017, PARK i współaut. 2018). Należy również zwrócić uwagę, że w warunkach hipoksji dochodzi do ograniczenia apetytu i zwiększenia podstawowej przemiany materii (BUTTERFIELD 1999, KAYSER i VERGAS 2013). Ograniczenie łaknienia następuje w wyniku zwiększenia uwalniania leptyny i cholecystokininy oraz redukcji stężenia greliny, hormonów uczestniczących w regulacji apetytu (YINGZONG i współaut. 2006, MILLET i współaut. 2016). Wyniki najnowszych badań wskazują, że trening realizowany w warunkach hipoksji przyczynia się do nasilenia redukcji tkanki tłuszczowej, a także obniżenia poziomu cholesterolu (LIZAMORE i HAMLIN 2017, PARK i LIM 2017, PARK i współaut. 2018). Kluczowy dla walki z otyłością jest fakt, że dzięki zastosowaniu bodźca hipoksycznego możliwe jest wywołanie odpowiedniej odpowiedzi organizmu już podczas wysiłku o niewielkiej intensywności, zmniejszając tym samym obciążenie mechaniczne podczas ćwiczeń. Powyższe korzyści pozwalają stwierdzić, że trening w hipoksji stanowi dobre rozwiązanie dla osób z nadwagą i otyłością, nasilając redukcję tkanki tłuszczowej i poprawę stanu zdrowia bez ryzyka przeciążenia stawów.

#### HIPOKSJA W PROFILAKTYCE I WSPOMAGANIU LECZENIA CUKRZYCY TYPU II

Wiadomym jest, że wysiłek fizyczny przyczynia się do zużycia glukozy i zwiększenia wrażliwości komórek na insulinę. Najnowsze badania wykazały, że systematyczny trening wytrzymałościowy wykonywany w warunkach hipoksji prowadzi w krótkim czasie do wzrostu ilości transporterów glukozy (GLUT4), w wyniku czego glukoza łatwiej dostaje się do komórek, a jej poziom we krwi ulega obniżeniu. Obserwuje się również poprawę wrażliwości komórek na insulinę i zwiększenie tolerancji glukozy, a także wzrostu aktywności enzymów glikolitycznych. Powyższe zmiany są wysoce korzystne w prewencji i leczeniu cukrzycy typu II (CHIU i współaut. 2004, URDAMPIL-LETA i współaut. 2012, DE GROOTE i współaut. 2018). Co więcej, pod wpływem ekspozycji na hipoksję, dzięki działaniu HIF możliwa jest rozbudowa mikronaczyń krwionośnych. Zmiany w tym zakresie mogą w znaczny sposób ograniczyć zaburzenia krążenia i zmniejszyć ryzyko wystąpienia angiopatii cukrzycowej.



## HIPOKSJA W PROFILAKTYCE I WSPOMAGANIU LECZENIA CHOROÓB UKŁADU KRAŻENIA

Wyniki badań dowodzą również, że systematyczny wysiłek fizyczny wykonywany w warunkach hipoksji, poprzez szereg mechanizmów adaptacyjnych, ogranicza ryzyko wystąpienia chorób układu krążenia, a także może wspomagać proces kardiorehabilitacji. Wykazano również, że trening w hipoksji jest skutecznym środkiem w profilaktyce lub leczeniu nadciśnienia tętniczego krwi (SEREBROVSKAYA i współaut. 2008). W odpowiedzi na hipoksję dochodzi do wzrostu aktywności syntazy tlenu azotu i wzrostu stężenia tlenu azotu. Przyczynia się to do rozkurczu mięśni gładkich, poszerzenia światła naczyń krwionośnych, a także obniżenia ciśnienia tętniczego (KOLAŘ i OŠTÁDAL 2004). Dowiedziono również, że trening wytrzymałościowy realizowany w środowisku hipoksyjnym prowadzi do rozszerzenia naczyń wieńcowych i obwodowych naczyń krwionośnych, zmniejsza miażdżycę tętnic, obniża sztywność tętnic oraz wpływa korzystnie na poprawę ciśnienia tętniczego (WANG i współaut. 2007, NISHIWAKI i współaut. 2011, PARK i LIM 2017). Dodatkowo, jak wspomniano wcześniej, trening w hipoksji przyczynia się do redukcji tkanki tłuszczowej, spadku poziomu cukru we krwi, a także obniżenia poziomu cholesterolu, co znacząco zmniejsza ryzyko wystąpienia chorób sercowo-naczyniowych.

Obecnie w wielu ośrodkach naukowych na świecie prowadzone są badania nad korzystnym wpływem hipoksji na mięsień sercowy. Badania te bazują na obserwacjach dotyczących występowania incydentu zawału mięśnia sercowego u ludzi zamieszkujących tereny góryste. Dowiedziono bowiem, że w populacjach zamieszkujących na wyższych wysokościach rzadziej dochodzi do incydentów zawału mięśnia sercowego w porównaniu do populacji terenów nizinnych (EZZATI i współaut. 2011). Pozwoliło to wysunąć przypuszczenia o kardioprotekcyjnym (chroniącym serce) wpływie hipoksji. Obecnie w literaturze funkcjonuje określenie „hartowania niedotlenieniem”. Uważa się, że zaadaptowany do stanu hipoksji mięsień sercowy znacznie lepiej radzi sobie z niedotlenieniem podczas incydentu wieńcowego. Możliwe jest to w wyniku efektywniejszego wydatkowania energii i tlenu przez mięsień sercowy, a także skuteczniejszej obrony przed dużą ilością reaktywnych form tlenu w trakcie zawału. Wykazano również, że ekspozycja na hipoksję przynosi korzystne efekty przed operacjami/zabiegami na sercu, pod postacią mniejszych uszkodzeń mięśnia sercowego (KOLAŘ i OŠTÁDAL 2004).

Czynnikiem pozytywnie wpływającym na mięsień sercowy jest HIF, którego zwiększona aktywność wiąże się z mniejszą powierzchnią uszkodzenia mięśnia sercowego po reperfuzji (przywróceniu krążenia w niedrożnej tętnicy wieńcowej). Istotną rolę odgrywa również wpływ hipoksji na wzrost stężenia tlenu azotu. Jak wspomniano wcześniej, rozszerzenie naczyń wieńcowych pod wpływem wzrostu stężenia tlenu azotu, umożliwia przepływ krwi przez nie w pełni drożne naczynia. Dodatkowo, tlenek azotu wpływa na uwalnianie czynnika wzrostu hepatocytów (HGF), który posiada udowodnione działanie kardioprotekcyjne i regeneracyjne (KOLAŘ i OŠTÁDAL 2004).

## HIPOKSJA W POPRAWIE JAKOŚCI ŻYCIA OSÓB STARSZYCH

Jakość życia seniorów w znacznej mierze zależna jest od dynamiki pojawiających się wraz z wiekiem objawów starzenia się takich jak: wzrost zawartości tkanki tłuszczowej, spadek masy mięśniowej, obniżenie gęstości tkanki kostnej, wzrost insulinooporności, a także nadciśnienie tętnicze. Systematyczne podejmowanie aktywności fizycznej działa prewencyjnie. Co więcej, dowiedziono, że realizowanie aktywności fizycznej w warunkach hipoksji zwiększa skuteczność tych działań (MILLET i współaut. 2016). Szerokie spektrum korzystnego wpływu środowiska hipoksyjnego daje obiecujące możliwości poprawy jakości życia osób starszych.

Jak wspomniano, trening w hipoksji przyczynia się do redukcji tkanki tłuszczowej, obniżenia ciśnienia tętniczego krwi, poprawy profilu lipidowego i utrzymania homeostazy glukozy. Ponadto ekspozycja organizmu na hipoksję skojarzona z treningiem oporowym przyczynia się do istotnego przyrostu siły i masy mięśniowej w porównaniu do treningu realizowanego w warunkach normoksji (NISHIMURA i współaut. 2010, CHYCKI i współaut. 2016). Z kolei w badaniach nad treningiem IHT wykazano wzrost gęstości mineralnej kości w wyniku zastosowanej procedury. Sugeruje to, że odpowiednio zaplanowana procedura IHT może być korzystna w zapobieganiu i leczeniu osteopenii i osteoporozy (GUNER i współaut. 2013, MARTINEZ-GUARDADO i współaut. 2019). Ponadto aktywność fizyczna w warunkach hipoksji prowadzi do poprawy zdrowia i wydolności fizycznej osób starszych, bez znacznego obciążenia stawów.

Należy wspomnieć, że systematyczna ekspozycja organizmu na hipoksję w połączeniu z treningiem fizycznym przyczynia się do poprawy funkcji poznawczych (SCHE-

GA i współaut. 2016). W rezultacie adaptacja organizmu do przerywanej hipoksji stanowi obiecujący sposób na spowolnienie postępującej degeneracji neuronów i procesu starzenia (BELIKOVA i współaut. 2012).

#### HIPOKSJA WE WSPOMAGANIU LECZENIA SCHORZEŃ UKŁADU ODDECHOWEGO

Wdrożenie treningu przerywanej hipoksji (IHT) do procesu leczenia schorzeń układu oddechowego może przysłużyć się poprawie komfortu życia pacjentów cierpiących na takie jednostki chorobowe jak: astma oskrzelowa czy przewlekła obturacyjna choroba płuc (POCHP). Wyniki badań wykazały, że IHT może skutecznie minimalizować objawy astmy oskrzelowej oraz zmniejszać nasilenie epizodów astmatycznych i przewlekłego zapalenia oskrzeli. Dowiedziono, że pod wpływem treningu IHT dochodzi do zwiększenia natężonej pojemności życiowej płuc (FVC) i natężonej objętości wydechowej (FEV). Następuje również wzrost aktywności enzymów antyoksydacyjnych, co doprowadza do zmniejszenia aktywności wolnych rodników i ma pozytywny wpływ na status immunologiczny pacjentów z astmą oskrzelową (SEREBOVSKAYA i współaut. 1998, 2012; HARRISON i współaut. 2002).

#### HIPOKSJA W ZABURZENIACH NEUROLOGICZNYCH

W literaturze występuje coraz więcej dowodów naukowych wskazujących na wazoprotekcyjny i neuroprotekcyjny wpływ środowiska hipoksyjnego na organizm. Systematyczne wdrażanie IHT wpływa na poprawę funkcji naczyń mózgowych i zapobiega zmniejszeniu gęstości naczyń krwionośnych w mózgu oraz zapobiega degeneracji neuronów. Ponadto, systematyczna ekspozycja na hipoksję stymuluje neurogenezę i neuroregenerację, ograniczając utratę neuronów w korze mózgowej, a także przyczynia się do poprawy regionalnego przepływu krwi dzięki zwiększonemu wytwarzaniu śródbłonkowego tlenu azotu. Wykazano również, że IHT wpływa na redukcję stresu oksydacyjnego, który odgrywa kluczową rolę w patogeniezie wielu chorób, m.in. w chorobach Alzheimera i Parkinsona (GONZALEZ-ROTHI i współaut. 2015, MANUKHINA i współaut. 2016).

Obecnie prowadzone są badania dotyczące zastosowania ekspozycji na hipoksję w przypadku chorób neurologicznych, między innymi takich jak: choroba Parkinsona, choroba Alzheimera, encefalopatia, uszkodze-

nie rdzenia kręgowego, udar niedokrwienny mózgu, epilepsja czy stres pourazowy. Dotychczas wykazano, że w wyniku zastosowania IHT może nastąpić poprawa pamięci oraz jakości snu, zmniejszenie bólu głowy, redukcja drżenia mięśniowego, funkcjonalne przywrócenie zdolności oddechowej po uszkodzeniu odcinka szyjnego kręgosłupa, a także spowolnienie neurodegeneracji i procesu starzenia (BELIKOVA i współaut. 2012; MANUKHINA i współaut. 2012, 2016; GONZALEZ-ROTHI i współaut. 2015). Dotychczasowe wyniki badań dostarczają coraz więcej dowodów wskazujących, że odpowiednio zaplanowana i kontrolowana przerywana ekspozycja na hipoksję może poprawić skuteczność tradycyjnych strategii neurorehabilitacyjnych (GONZALEZ-ROTHI i współaut. 2015). Ponadto w ostatnim czasie intensywnie bada się znaczenie neurotroficznego czynnika pochodzenia mózgowego (BDNF) w warunkach hipoksji (PIOTROWICZ i współaut. 2019, 2020), którego rola nie została jeszcze w pełni poznana i wymaga dalszych badań.

#### PODSUMOWANIE

Przedstawione doniesienia dowodzą, że zjawisko hipoksji może być niezwykle skutecznym środkiem treningowo-terapeutycznym. Należy pamiętać, że kluczowym czynnikiem warunkującym skuteczną stymulację mechanizmów adaptacyjnych w organizmie jest odpowiedni dobór zarówno czasu ekspozycji, natężenia hipoksji, jak i zastosowanie odpowiednich bodźców treningowych. Obecnie, mimo możliwie szerokiego wykorzystania hipoksji w medycynie czy terapiach rehabilitacyjnych, brak jest jednoznacznych procedur postępowania w poszczególnych jednostkach chorobowych, co powinno być przedmiotem dalszych badań naukowych.

#### Streszczenie

Pierwsze badania z zakresu wpływu hipoksji na organizm człowieka koncentrowały się głównie na zastosowaniach w obszarze wojskowości, medycyny lotniczej, oraz treningu sportowego. W ostatnich latach dużo uwagi poświęca się koncepcji wykorzystania środowiska hipoksyjnego jako środka terapeutycznego w celu wspomaganie leczenia i profilaktyki niezakaźnych chorób przewlekłych, a także poprawy jakości życia pacjentów i osób starszych. Ekspozycja organizmu na warunki hipoksji, zarówno w spoczynku, jak i w połączeniu z aktywnością fizyczną, przyczynia się do uruchomienia w organizmie licznych mechanizmów adaptacyjnych. Zmiany te w znacznej mierze mogą przyczyniać się do poprawy skuteczności tradycyjnych metod treningowych i terapeutycznych. Szerokie spektrum oddziaływania hipoksji na organizm człowieka sprawia, że zjawisko to może być niezwykle skutecznym środkiem treningowo-terapeutycznym w leczeniu i profilaktyce otyłości, cukrzycy typu II, nadciśnienia tętniczego, chorób układu krążenia i oddechowego, a także w zaburzeniach neurologicznych.

## LITERATURA

- BELIKOVA M. V., KOLESNIKOVA E. E., SEREBROVSKAYA T. V., 2012. *Intermittent hypoxia and experimental Parkinson's disease*. [W:] *Intermittent hypoxia and human diseases*. Xi L., SEREBROVSKAYA T.V. (red.). Springer, London, 147-153.
- BROCHERIE F., MILLET G. P., D'HULST G., VAN THIENEN R., DELDICQUE L., GIRARD O., 2018. *Repeated maximal-intensity hypoxic exercise superimposed to hypoxic residence boosts skeletal muscle transcriptional responses in elite team-sport athletes*. *Acta Physiol.* 222, doi: 10.1111/apha.12851.
- BUTTERFIELD G. E., 1999. *Nutrient requirements at high altitude*. *Clin. Sports Med.* 18, 607-621.
- CHIU L. L., CHOU S. W., CHO Y. M., HO H. Y., IVY J. L., HUNT D., WANG P. S., KUO C. H., 2004. *Effect of prolonged intermittent hypoxia and exercise training on glucose tolerance and muscle GLUT4 protein expression in rats*. *J. Biomed. Sci.* 11, 838-846.
- CHYCKI J., CZUBA M., GOŁAŚ A., ZAJĄC A., FIDOS-CZUBA O., MŁYNARZ A., SMÓŁKA W., 2016. *Neuroendocrine responses and body composition changes following resistance training under normobaric hypoxia*. *J. Hum. Kinet.* 53, 91-98.
- CZUBA M., 2013. *Wpływ hipoksji hipo- i normobarycznej na wydolność aerobową oraz możliwość wysiłkowe zawodników dyscyplin wytrzymałościowych w normoksji*. Wydawnictwa AWF, Katowice.
- CZUBA M., WAŚKIEWICZ Z., ZAJĄC A., POPRZECKI S., CHOLEWA J., ROCZNIK R., 2011. *The effects of intermittent hypoxic training on aerobic capacity and endurance performance in cyclists*. *J. Sport. Sci. Med.* 10, 175-183.
- CZUBA M., WILK R., KARPINSKI J., CHALIMONIUK M., ZAJĄC A., LANGFORT J., 2017. *Intermittent hypoxic training improves anaerobic performance in competitive swimmers when implemented into a direct competition mesocycle*. *PLoS One* 12, e0180380.
- CZUBA M., FIDOS-CZUBA O., PŁOSZCZYCA K., ZAJĄC A., LANGFORT J., 2018. *Comparison of the effect of intermittent hypoxic training vs. the live high, train low strategy on aerobic capacity and sports performance in cyclists in normoxia*. *Biol. Sport.* 35, 39-48.
- CZUBA M., BRIL G., PŁOSZCZYCA K., PIOTROWICZ Z., CHALIMONIUK M., ROCZNIK R., ZEMBRON-ŁACNY A., DAGMARA GERASIMUK D., LANGFORT J., 2019. *Intermittent hypoxic training at lactate threshold intensity improves aiming performance in well-trained biathletes with little change of cardiovascular variables*. *Biomed. Res. Int.* 2019, doi: 10.1155/2019/1287506.
- DE GROOTE E.D., BRITTO F.A., BULLOCK L., FRANÇOIS M., BUCK C.D., NIELENS H., DELDICQUE L., 2018. *Hypoxic training improves normoxic glucose tolerance in adolescents with obesity*. *Med. Sci. Sports Exerc.* 50, 2200-2208.
- DUFOUR S. P., PONSOT E., ZOLL J., DOUTRELEAU S., LONSDORFER-WOLF E., GENY B., LAMPERT E., FLÜCK M., HOPPELER H., BILLAT V., METAUER B., RICHARD R., LONSDORFER J., 2006. *Exercise training in normobaric hypoxia in endurance runners. I. Improvements in aerobic performance capacity*. *J. Appl. Physiol.* 100, 1238-1248.
- EZZATI M., HORWITZ M. E., THOMAS D. S., FRIEDMAN A. B., ROACH R., CLARK T., 2011. *Altitude, life expectancy and mortality from ischemic heart disease, stroke, COPD and cancers: national population-based analysis of US counties*. *J. Epidemiol. Comm. Health* 66, doi: 10.1136/jech.2010.112938.
- GIRARD O., BROCHERIE F., MILLET G. P., 2017. *Effects of altitude/hypoxia on single- and multiple-sprint performance: a comprehensive review*. *Sports Med.* 47, 1931-1949.
- GONZALEZ-ROTHI E. J., LEE K. Z., DALE E. A., REIER P. J., MITCHELL G. S., FULLER D. D., 2015. *Intermittent hypoxia and neurorehabilitation*. *J. Appl. Physiol.* 119, 1455-1465.
- GUNER I., UZUN D. D., YAMAN M. O., GENÇ H., GELISGEN R., KORKMAZ G. G., HALLAC M., YELMEN N., SAHIN G., KARTER Y., SIMSEK G., 2013. *The effect of chronic long-term intermittent hypobaric hypoxia on bone mineral density in rats: role of nitric oxide*. *Biol. Trace Elem. Res.* 154, 262-267.
- HARRISON C. C., FLEMING J. M., GILES L. C., 2002. *Does interval hypoxic training affect the lung function of asthmatic athletes*. *New Zeal. J. Sport. Med.* 30, 64-67.
- KAYSER B., VERGES S., 2013. *Hypoxia, energy balance and obesity: from pathophysiological mechanisms to new treatment strategies*. *Obes. Rev.* 14, 579-592.
- KE Q., COSTA M., 2006. *Hypoxia-inducible factor-1 (HIF-1)*. *Mol. Pharmacol.* 70, 1469-1480.
- KOLAŘ F., OŠTÁDAL B., 2004. *Molecular mechanisms of cardiac protection by adaptation to chronic hypoxia*. *Physiol. Res.* 53, 3-13.
- LEVINE B. D., STRAY-GUNDERSEN J., 1997. *"Living high-training low": effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance*. *J. Appl. Physiol.* 83, 102-112.
- LIZAMORE C. A., HAMLIN M. J., 2017. *The use of simulated altitude techniques for beneficial cardiovascular health outcomes in nonathletic, sedentary, and clinical populations: a literature review*. *High Alt. Med. Biol.* 18, 305-321.
- MANUKHINA E. B., GORYACHEVA A. V., PSHENNIKOVA M. G., MALYSHEV I. Y., MALLET R. T., DOWNEY H. F., 2012. *Protective effects of adaptation to hypoxia in experimental Alzheimer's disease*. [W:] *Intermittent hypoxia and human diseases*. Xi L., SEREBROVSKAYA T.V. (red.). Springer, London, 155-171.
- MANUKHINA E. B., DOWNEY H. F., SHI X., MALLET R. T., 2016. *Intermittent hypoxia training protects cerebrovascular function in Alzheimer's disease*. *Exp. Biol. Med.* 241, 1351-1363.
- MARTINEZ-GUARDADO I., RAMOS-CAMPO D. J., OLCINA G. J., RUBIO-ARIAS J. A., CHUNG L. H., MARIN-CASCALES E., ALCARAZ P. E., TIMÓN R., 2019. *Effects of high-intensity resistance circuit-based training in hypoxia on body composition and strength performance*. *Eur. J. Sport Sci.* 19, 1-11.
- MILLET G. P., JORNET K., 2019. *On top to the top - acclimatization strategy for the "fastest known time" to mount everest*. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 14, 1438-1441.
- MILLET G. P., DEBEVEC T., BROCHERIE F., MALATESTA D., GIRARD O., 2016. *Therapeutic use of exercising in hypoxia: promises and limitations*. *Front. Physiol.* 7, doi: 10.3389/fphys.2016.00224.
- NISHIMURA A., SUGITA M., KATO K., FUKUDA A., SUDO A., UCHIDA A., 2010. *Hypoxia increases muscle hypertrophy induced by resistance training*. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 5, 497-508.
- NISHIWAKI M., KAWAKAMI R., SAITO K., TAMAKI H., TAKEKURA H., OGITA F., 2011. *Vascular adaptations to hypobaric hypoxic training in post-*



- menopausal women. *J. Physiol. Sci.* 61, 83-91.
- PARK H.Y., LIM K., 2017. *The effects of aerobic exercise at hypoxic condition during 6 weeks on body composition, blood pressure, arterial stiffness, and blood lipid level in obese women.* *Int. J. Sports Sci.* 1, 1-5.
- PARK H.Y., KIM J., PARK M.Y., CHUNG, N., HWANG H., NAM S.S. 2018. *Exposure and exercise training in hypoxic conditions as a new obesity therapeutic modality: a mini review.* *J. Obes. Metab. Syndr.* 27, 93-101.
- PIOTROWICZ Z., CHALIMONIUK M., PŁOSZCZYCA K., CZUBA M., LANGFORT J., 2019. *Acute normobaric hypoxia does not affect the simultaneous exercise-induced increase in circulating BDNF and GDNF in young healthy men: A feasibility study.* *PLoS One* 14, e0224207.
- PIOTROWICZ Z., CHALIMONIUK M., PŁOSZCZYCA K., CZUBA M., LANGFORT J., 2020. *Exercise-induced elevated bdnf level does not prevent cognitive impairment due to acute exposure to moderate hypoxia in well-trained athletes.* *Int. J. Mol. Sci.* 21, 5569.
- PŁOSZCZYCA K., LANGFORT J., CZUBA M., 2018. *The effects of altitude training on erythropoietic response and hematological variables in adult athletes: a narrative review.* *Front. Physiol.* 9, doi: 10.3389/fphys.2018.00375.
- SCHEGA L., PETER B., BRIGADSKI T., LESSMANN V., ISERMANN B., HAMACHER D., TÖRPEL A., 2016. *Effect of intermittent normobaric hypoxia on aerobic capacity and cognitive function in older people.* *J. Sci. Med. Sport* 19, 941-945.
- SEREBROVSKAYA T. V., MANKOVSKAYA I. N., LYSENKO G. I., SWANSON R., BELINSKAIA I. V., OBERENKO O. A., DANILUK S. V., 1998. *A method for intermittent hypoxic exposures in the combined treatment of bronchial asthma patients.* *Lik. Sprava* 6, 104-108.
- SEREBROVSKAYA T. V., MANUKHINA E. B., SMITH M. L., DOWNEY H. F., MALLET R. T., 2008. *Intermittent hypoxia: cause of orthotherapy for systemic hypertension?* *Exp. Biol. Med.* 233, 627-650.
- SEREBROVSKAYA T. V., BAKUNOVSKY A. N., NESVITAILOVA K. V., MANKOVSKAYA I., 2012. *Intermittent hypoxia in treatment of bronchial asthma in childhood.* [W:] *Intermittent hypoxia and human diseases.* Xi L., SEREBROVSKAYA T. V. (red.). Springer, London, 135-143.
- URDAMPILLETA A., GONZÁLEZ-MUNIESA P., PORTILLO M. P. MARTÍNEZ J. A., 2012. *Usefulness of combining intermittent hypoxia and physical exercise in the treatment of obesity.* *J. Physiol. Biochem.* 68, 289-304.
- VOGT M., PUNTSCHART A., GEISER J., ZULEGER C., BILLETER R., HOPPELER H., 2001. *Molecular adaptations in human skeletal muscle to endurance training under simulated hypoxic conditions.* *J. Appl. Physiol.* 91, 173-182.
- WANG J. S., CHEN L. Y., FU L. L., CHEN M. L., WONG M. K., 2007. *Effects of moderate and severe intermittent hypoxia on vascular endothelial function and haemodynamic control in sedentary men.* *Eur. J. Appl. Physiol.* 100, 127-135.
- WILBER R. L., STRAY-GUNDERSON J., LEVINE B. D., 2007. *Effect of hypoxic "dose" on physiological responses and sea-level performance.* *Med. Sci. Sports Exerc.* 39, 1590-1599.
- WOLSKI L. A., MCKENZIE D. C., WENGER H. A., 1996. *Altitude training for improvements in sea level performance: is there scientific evidence of benefit?* *Sports Med.* 22, 251-263.
- YINGZHONG Y., DROMA Y., RILI G., KUBO K., 2006. *Regulation of body weight by leptin, with special reference to hypoxia-induced regulation.* *Intern. Med.* 45, 941-946.
- ZOLL J., PONSOT E., DUFOUR S., DOUTRELEAU S., VENTURA-CLAPIER R., VOGT M. HOPPELER H., RICHARD R., FLÜCK M., 2006. *Exercise training in normobaric hypoxia in endurance runners. III. Muscular adjustments of selected gene transcripts.* *J. Appl. Physiol.*, 100, 1258-1266.

**KOSMOS Vol. 69, 4, 785–792, 2020**

MIŁOSZ CZUBA<sup>1</sup>, JÓZEF LANGFORT<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Department of Kinesiology, Institute of Sport, Trylogii 2, 01-982 Warsaw, <sup>2</sup>Institute of Sport Sciences, he Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education, 72A Mikołowska Str., 40-065 Katowice, E-mail: milosz.czuba@insp.waw.pl, langfort@imdik.pan.pl*

#### HYPOXIA – USE IN TRAINING AND THERAPY

##### Summary

The first studies on the effect of hypoxia on the human body focused primarily on military applications, aviation medicine and sports training. In recent years, particular attention has been devoted to the concept of using the hypoxic environment as a therapeutic agent to support the treatment and prevention of non-communicable chronic diseases, and to improve the quality of life of patients and older adults. Exposure of the human body to the hypoxic conditions, both at rest and in combination with physical activity, activates several adaptive mechanisms in the body. These changes can significantly contribute to the improvement in the effectiveness of conventional training and therapeutic methods. The comprehensive effect of hypoxia on the human body makes this phenomenon an extremely effective training and therapeutic agent in the treatment and prevention of obesity, type II diabetes, arterial hypertension, diseases of the cardiovascular and respiratory systems, and neurological disorders.

Key Words: hypoxia, erythropoiesis, intermittent hypoxic training, sports training, therapeutic effect of hypoxia

**Miłosz Czuba** ukończył Akademię Wychowania Fizycznego w Katowicach, na której uzyskał stopień doktora i habilitację w zakresie nauk o kulturze fizycznej. Jego główne zainteresowania naukowe dotyczą przede wszystkim wpływu hipoksji na możliwości wysiłkowe człowieka, diagnostyki stanu wytrenowania sportowców, a także wspomaganie możliwości wysiłkowych człowieka. Kierował trzema grantami ministerialnymi i NCN. Jest autorem 38 publikacji indeksowanych przez Web of Science.

**Józef Langfort** jest profesorem nauk medycznych (rok nadania 2004) i nauk o kulturze fizycznej (rok nadania 2009). Zajmuje się badaniami dotyczącymi regulacji metabolizmu mięśni szkieletowych pod wpływem wzmożonej aktywności ruchowej, zmianami w OUN indukowanymi jednorazowymi wysiłkami, procesem treningowym oraz hipoksją. Badania nad regulacją metabolizmu mięśni realizował w ramach współpracy z Zakładem Biochemii Uniwersytetu w Oksfordzie (Prof. E. A. Newsholme) oraz Kopenhaskim Centrum Badań nad Mięśniami (Prof. B. Saltin i Prof. H. Galbo). Odbył także staże na Uniwersytecie im. Claude'a Bernarda w Lyonie, Francja (Dr. D. Desplanches) oraz na Uniwersytecie Franciszka Józefa w Grazu, Austria. (Prof. S. Porta). Kierował pięcioma grantami i jest autorem 132 publikacji indeksowanych przez Web of Science.