

NORMOBARIA – FIZJOLOGICZNE UWARUNKOWANIA I MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWAŃ

Gabriela Henrykowska¹⁾, T. Wójtowicz²⁾, Weronika Czuj³⁾, Ewa Zieliński⁴⁾, Piotr Siermontowski²⁾

¹⁾ Uniwersytet Medyczny w Łodzi, Zakład Epidemiologii i Zdrowia Publicznego

²⁾ Katedra Technologii Prac Podwodnych, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia

³⁾ Indywidualna Specjalistyczna Praktyka Lekarska Stalowa Wola

⁴⁾ Katedra Ratownictwa Medycznego, Collegium Medicum w Bydgoszczy, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

STRESZCZENIE

W artykule omówiono wpływ na organizm człowieka oddychania w atmosferze warunków normobarycznych lub lekko hiperbarycznych, a także oddychania mieszaniną ze zwiększoną zawartością tlenu z dodatkiem dwutlenku węgla. Porównano pozytywne i negatywne skutki warunków hiperbarycznych z warunkami normobarycznymi i przedstawiono wskazania do ich stosowania.

Słowa kluczowe: normobaria, hiperoksja, hiperbaria tlenowa, hiperkapnia, rozszerzenie naczyń, natlenienie.

ARTICLE INFO

PolHypRes 2024 Vol. 87 Issue 2 pp. 33 – 40

ISSN: 1734-7009 **eISSN:** 2084-0535

DOI: 10.2478/phr-2024-0009

Strony: 8, rysunki: 0, tabele: 0

page www of the periodical: www.phr.net.pl

Publisher

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society

Typ artykułu: przeglądowy

Termin nadesłania: 13.02.2024 r.

Termin zatwierdzenia do druku: 03.03.2024 r.



WSTĘP

Przebywanie w środowisku hiperbarycznym czy w środowisku o zmienionym w stosunku do powietrza składzie mieszaniny oddechowej nigdy nie jest dla organizmu człowieka obojętne. Zmiany składu i ciśnienia atmosfery mogą przynosić efekty pozytywne bądź negatywne. O ile oddziaływanie podwyższonego ciśnienia (hiperbaria) noszą za sobą dość liczne zagrożenia związane z fizyką gazów i oddziaływaniem hiperbarii na organizm [1], o tyle normobaria nie stwarza już tak istotnych zagrożeń [2,3].

Normobaria - w dokładnym tłumaczeniu ciśnienie normalne. Jest to oddziaływanie na organizm za pomocą powietrza o zmienionym składzie, którym się oddycha. Warunki ciśnienia są zbliżone do normalnych, bądź podlegają nieznacznym odchyleniom (w górę) od ciśnienia atmosferycznego [4].

Od ponad stu lat stosuje się terapię tlenową, która polega na dostarczaniu większej ilości tlenu do organizmu, co przyspiesza leczenie różnych dolegliwości i wspomaga regenerację. Może to oznaczać oddychanie powietrzem o zwiększonej zawartości tlenu lub nawet czystym tlenem. W postępowaniu ratunkowym i leczniczym od ponad wieku stosowana jest hiperoksja czyli działanie zwiększonej zawartości tlenu, czy też oddychanie czystym tlenem [5,6]. Mimo istotnych i dokładnie opisanych powikłań i następstw tego typu terapii jest ona powszechnie stosowana w medycynie w związku z przewagą efektów pozytywnych nad negatywnymi [7,8,9,10].

W medycynie stosowana jest również, choć ostatnio coraz rzadziej, dwuskładnikowa mieszanina składająca się z czystego tlenu z domieszką dwutlenku węgla [11]. W swoim działaniu wykorzystuje ona efekt wazodilatacji, szczególnie naczyń mózgowych, dwutlenkiem węgla, który przeciwdziała zwężaniu naczyń mózgowych przez wysokie stężenia tlenu [12].

Zalety terapeutyczne hiperbarii, a także normobarii doceniono także poza medycyną. Jest ona wykorzystywana zarówno w rekreacji jak i treningu sportowym [13,14] czy kosmologii, choć akurat w tej dziedzinie działanie jest zwykle odwrotne w stosunku do zamierzonego [15]. Ponadto, przynosi wymierne efekty w poprawie wydolności fizycznej i psychicznej oraz akceleracji wypoczynku [16,17].

NORMOBARIA

Zachęcające do korzystania z zabiegów w środowisku normobarii androny o „powrocie do atmosfery w której powstał gatunek człowieka” są nie tylko bezpodstawne ale także niekonieczne, gdyż pozytywne działanie metody w zakresie rekreacji i poprawy samopoczucia broni się samo. Natomiast odniesienie do atmosfery ziemskiej jest jak najbardziej słuszne, jednak przedział czasowy jest o kilka milionów lat przesunięty; stosowana atmosfera jest bliższa tej która istniała w okresie formowania się skorupy planety i dużej aktywności wulkanicznej a nie znacznie późniejszego okresu powstawania życia człowiekowatych [18,19].

Istotą działania hiperoksji w normobarii jest poprawa utlenowania organizmu.

O hiperoksji mówimy gdy ciśnienie parcjalne tlenu w krwi jest wyższe niż 300 mm słupa rtęci [Hg] [5, 20]. Dla uzyskania takiego ciśnienia parcjalego tlenu we krwi, jego ciśnienie parcjale w mieszaninie oddechowej powinno wynosić co najmniej 480 mmHg, czyli udział tlenu w mieszaninie to minimum 44 % na poziomie morza. Takie stężenie tlenu jest wartością graniczną dla negatywnych i bardzo negatywnych efektów oddziaływania tlenu na organizm człowieka, szczególnie przy działaniu długotrwałym, bądź cyklicznym, co jest równoznaczne ze stosowaniem tylko w konkretnych, ściśle określonych wskazaniach i pod kontrolą lekarską [21,22,23].

W atmosferze stosowanej w rekreacyjnych komorach normobarycznych, wzbogaconej w tlen i dwutlenek węgla nigdy nie jest osiąganego ciśnienie parcjale tlenu mogące spowodować negatywne następstwa. Natomiast pozytywne działania, szczególnie przy incydentalnym i krótkotrwałym stosowaniu są warte rozważenia [11,14,24].

Drugim, poza tlenem składnikiem mieszaniny oddechowej, którego zawartość jest różna od powietrza, jest dwutlenek węgla. O hiperkapni, czyli zwiększonym poziomie dwutlenku węgla we krwi mówimy, gdy jego ciśnienie parcjale także osiągnie 45 mm Hg lub więcej [25]. Aby taką wartość osiągnąć, zawartość dwutlenku węgla w powietrzu oddechowym powinna wynosić 0,24 mmHg. Jednak głównym źródłem dwutlenku węgla nie jest powietrze oddechowe lecz metabolizm organizmu.

W atmosferze, jaka stosowana jest w rekreacyjnej normobarii ilość CO₂ nie osiąga nigdy wartości, które mogłyby być szkodliwe dla organizmu [2].

W materiałach opisujących terapię normobaryczną wspomina się także o niewielkiej ilości wodoru w mieszaninie oddechowej. Jest to gaz, znajdujący się w tej samej części układu okresowego pierwiastków co hel, azot czy argon. W warunkach normobarii jest całkowicie obojętny dla ustroju człowieka, nie wchodzi w żadne reakcje chemiczne i nie bierze udziału w metabolizmie komórki [26]. Nie ma on więc bezpośredniego znaczenia fizjologicznego a dodawanie go do mieszaniny pogarsza jedynie warunki bezpieczeństwa. Jako gaz silnie wybuchowy i palny przechowywany w butlach, podczas przetaczania stwarza wielkie niebezpieczeństwo wybuchu czy pożaru [27]. Dodatek wodoru oceniać można jedynie pod kątem jego znikomej gęstości co poprawia wydolność oddechową. Oczywiście jedynie teoretycznie, gdyż ze względu śladowy jedynie procentowy udział w mieszaninie jest to niewyczuwalne.

Ostatnim istotnym parametrem jest właściwy dobór wilgotności - zawartości pary wodnej w mieszaninie oddechowej, nie pozwalającej na wysuszenie dróg oddechowych [28].

Właściwie dobrany skład mieszaniny oddechowej pozwala na pełne wykorzystanie wdychanego tlenu bez osiągnięcia szkodliwych dla tkanek ciśnień parcjalnych, a to dzięki synergistycznemu działaniu dwutlenku węgla [7,25]. Mechanizmy obrony organizmu przed hiperoksją to między innymi odruchowy skurcz naczyń krwionośnych, szczególnie mózgowych pod wpływem wzrostu ciśnienia parcjalego tlenu we krwi czy odruchowy skurcz tchawicy i oskrzeli podczas oddychania czystym tlenem [28,29].

W układzie oddechowym człowieka większe znaczenie regulacyjne niż tlen ma dwutlenek węgla. Jego obecność ogranicza, bądź znosi całkowicie wymienione powyżej naczyniowe mechanizmy ochrony przed hiperoksją. Podwyższony poziom dwutlenku węgla jest również głównym czynnikiem stymulującym ośrodek oddechowy [11,25]. Tak więc zwiększenie zawartości dwutlenku węgla w mieszaninie oddechowej bądź zwiększona retencja dwutlenku węgla powstającego podczas przemian metabolicznych organizmu człowieka gwarantuje właściwą wymianę gazową na poziomie płuc, a przede wszystkim szerokie naczynia zaopatrujące w krew mózg [11,12]. Tu kluczowe znaczenie ma przekrój poszczególnych naczyń domózgowych, oraz stan ścian wewnętrznych tychże, pozostające w ścisłym związku ze współczynnikiem laminarności/turbulencji przepływu krwi, w rozumieniu fizycznym traktowanej jako dynamiczna ciecz niejednorodna. Ma to ścisły związek z tzw. „chwilową objętością/pojemnością transferową” krwi przepływającej – trywializując, stanowi łatwy do oceny czynnik arytmetyczny, nazywany w intensywnej terapii i transfuzjologii „ile niesie?, ile może”? Niestety, dwutlenek węgla nie jest gwarancją na normotypową szerokość oskrzeli i tchawicy – tu efekt skurczu pozostaje. Również długotrwałe przebywanie w takiej atmosferze (na szczęście skrajnie rzadkie) może skutkować zmianą struktury śluzu oskrzelowego [30,31]. Jednak to pogorszenie fizycznych warunków wentylacji nie ma większego znaczenia, gdyż w „komorach normobarycznych” osoby przebywające częściej oddają się medytacji niż intensywnym ćwiczeniom fizycznym.

Osobnej uwagi wymaga tzw. Efekt Bohra [32]. Ta fizjologiczna reakcja na spadek pH krwi (czyli jej zakwaszenie) również ma wpływ na przebieg i wynik transportu tlenu przez krew. Tlen we krwi transportowany jest w dwóch postaciach: jako fizyczny roztwór w osoczu oraz w postaci związanej z hemoglobina w erytrocytach. Powstanie tego mechanizmu w procesie ewolucji zostało wymuszone przez zwiększenie zapotrzebowania na tlen organizmów stałocieplnych, o dużej masie, dużej sprawności mięśni a także o rosnącym wraz z postęпами ewolucji zapotrzebowaniu układu nerwowego na tlen. Sam, rozpuszczony fizycznie w osoczu krwi tlen nie pozwala przy ciśnieniu atmosferycznym na prawidłowe funkcjonowanie organizmu. Stąd konieczność przyłączenia cząsteczek tlenu do hemoglobiny zawartej w krwinkach czerwonych podczas natleniania krwi w płucach i odłączania go podczas oddawania w tkankach. Regulatorem tego procesu jest również dwutlenek węgla, który będąc bezwodnikiem słabego kwasu węglowego, rozpuszczony w osoczu zakwasza krew obniżając pH i ułatwiając oddzielanie cząsteczek tlenu od hemoglobiny w tkankach [33]. W warunkach fizjologicznych efekt ten występuje podczas wzmożonego wysiłku, gdzie w mięśniach powstaje duża ilość metabolitów w tym dwutlenku węgla. Drugą „częścią” tego mechanizmu fizjologicznego jest powstający w erytrocytach podczas przemian beztlenowych fosforanowy ester kwasu glicerynowego wykazujący kompatybilne do dwutlenku węgla działanie. Oczywiście ekspozycja w komorze normobarycznej wykorzystuje tylko pierwszą, związaną z obniżeniem pH część efektu Bohra. Jednak ułatwienie oddawania tlenu w tkankach jest istotne dla poprawy utlenowania [32].

DZIAŁANIE

Pozytywne, mające swoje fizjologiczne podstawy i kliniczne potwierdzenie efekty wykorzystania podwyższonego poziomu tlenu a także dwutlenku węgla w normobarii można podzielić na dwie grupy: te same co w klasycznej terapii hiperbarycznej, czyli działania w konkretnych stanach chorobowych a także drugą grupę oddziaływań - związaną z relaksacją, wypoczynkiem i regeneracją [16,17]. Do pierwszej zaliczyć należy sprzyjanie gojeniu się ran, zmniejszenie nasilenia zakażeń, szczególnie ropnych, działanie bakteriobójcze i, potwierdzony ostatnimi badaniami, wpływ wazogeny [34,35,36]. Natomiast do drugiej należy niewątpliwie szerokie spektrum miorelaksacji czynnego aparatu ruchu, wzrost utlenowania ustroju i stymulacja erytropoezy. Powiększa to pulę zasobności czerwonekrwinkowej, a tym samym wzrost wydolności organizmu poprzez zwiększenie komponenty oxynośnikowej (gazonośnej) objętości krwi krążącej [14,16]. Nie należy zapominać także o szybszym i łatwiejszym osiągnięciu oraz dłuższym utrzymaniu równowagi preenzymatycznych i enzymatycznych aktywatorów osoczowych, jakże ważnych w neurotransmisji łańcucha receptor – koordynator – efektor nerwów obwodowych, a zwłaszcza ich, bardziej podatnych na niedotlenienie względne, włókien eferentnych [37,38].

Ciśnienie 1500 hPa, = 150 kPa w tym: tlenu 37% = 421,8 mmHg = 56,24 kPa, gdy warunki podstawowe tworzą = max. 100 mmHg = 13,33 kPa dwutlenku węgla 1,079% = 12,3 mmHg = 1,64 kPa

Jak zostało przedstawione na powyższych wyliczeniach, gdzie za podstawę kalkulacyjną przyjęto skład atmosfery w warunkach poziomu morza („zwykłe powietrze”), donacyjne ciśnienie rozporządzalne tlenu w warunkach terapeutycznych jest ponad 4 krotnie wyższe. Przedstawione liczby dostatecznie jasno manifestują spodziewane korzyści fizjologiczne.

Przebywanie w powyższej atmosferze bogatego w tlen powietrza z domieszką dwutlenku węgla pod nieznacznie zwiększonym ciśnieniem pozwala na uzyskanie licznych pozytywnych efektów relaksacji i akceleracji wypoczynku a nawet terapeutycznych, bez narażania osób korzystających na negatywne efekty tlenu pod zwiększonym ciśnieniem [16,17,37,38]. Osiągane w planowanych warunkach wartości ciśnienia parcjalnego tlenu dalekie są od ciśnień określanych jako hiperoksja powodujących ostre uszkodzenia komórek i tkanek, jak również nie zagrażają tlenowym uszkodzeniem mięszu płucnego przy ekspozycjach długotrwałych [4-6].

Tzw. „tlenowy zegar płucny” czyli jednostka tlenowej toksyczności płucnej odpowiada oddychaniu czystym tlenem pod ciśnieniem atmosferycznym (98,066 kPa) przez 1 minutę. Do uszkodzenia płuc dochodzi po przekroczeniu 800 jednostek toksyczności płucnej czyli po ok. 13 godzinach ekspozycji. Oczywiście w warunkach podwyższonego ciśnienia mieszaniny oddechowej zgodnie z prawem Daltona rosną również ciśnienia poszczególnych jej składników a więc oddziaływanie toksyczne na płuca rośnie w podobnym postępie [1,23].

Z wielośrodkowych badań wynika, że w ogóle o możliwości uszkodzenia mięszu płucnego można mówić gdy ciśnienie tlenu w mieszaninie oddechowej przekracza 50 kPa. Skład proponowanej mieszaniny oddechowej i proponowane ciśnienie pracy to wartość zbliżona do granicznej, jednak proponowany czas ekspozycji (2 godziny) jest kilkakrotnie krótszy od czasu po którym można mówić o możliwości uszkodzenia mięszu płucnego. Stąd bezpieczeństwo metody w porównaniu z konkurencyjną, stosowaną w tych samych celach hiperbarią tlenową [23].

Korzyści zdrowotne z przebywania w warunkach normobarycznych (przy zwiększonej zawartości tlenu i poziomie dwutlenku węgla w powietrzu oddechowym) to poprawa utlenowania tkanek, a więc:

- przyspieszenie metabolizmu kwasu mlekowego – regeneracja po długotrwałym wysiłku fizycznym. Efekt najsilniejszy, pozwalający na kilkakrotne skrócenie czasu regeneracji po wysiłku i umożliwienie podjęcia następnego [14];
- poprawa tolerancji wysiłku co idealnie wpisuje się w cykl ćwiczeń fizycznych [13, 39];
- przyspieszenie metabolizmu aldehydów – regeneracja po zatruciu alkoholem etylowym [37];
- krótkotrwałe wzmoczenie samopoczucia na skutek poprawy dostępności tlenu dla mózgu [3, 38, 39];
- krótkotrwała poprawa wydolności umysłowej wynikająca z większej dostępności tlenu [40, 41];
- poprawa ukrwienia tkanek u osób z chorobami układu krążenia [4,5];
- poprawa ukrwienia tkanek u osób z cukrzycą (w przypadkach mikroangiopatii cukrzycowej) [42, 43];
- eliminacja dolegliwości w przypadkach migreny naczyniopochodnej [24];
- poprawa wyjściowych warunków przed krótkotrwałym wysiłkiem fizycznym [13,14,39];
- przyspieszenie regeneracji po urazach i kontuzjach z uszkodzeniem naczyń krwionośnych w mięśniach i narządach mięszkowych (wymagane ekspozycje wielokrotne)[17].
Mniej oczywistymi efektami, ale obserwowanymi są:
- zwiększenie odporności na zmęczenie, przy kilkukrotnych ekspozycjach [17];
- leczenie zespołu przewlekłego zmęczenia oraz depresji [44].

Istotną zaletą komory normobarycznej jest możliwość swobodnego poruszania się podczas ekspozycji. Nie ma tu ograniczeń związanych z maską i węzami doprowadzającymi mieszaninę oddechową. Wykorzystywane wewnątrz komory normobarycznej urządzenia elektroniczne (choćby wyświetlacze ciekłokrystaliczne czy twarde dyski) nie muszą być odporne na podwyższone ciśnienie, co zwiększa pulę urządzeń, które mogą być wykorzystywane wewnątrz komory normobarycznej. Ponadto, łatwiej i przy mniejszych kosztach można przystosować komorę do używania w niej sprzętu sportowego. Nie ma tu konieczności posiadania certyfikatu „czystości tlenowej”, niezbędnego w komorach hiperbarycznych.

Normobaria w atmosferze bogatej w tlen powietrza pozbawiona jest licznych zagrożeń dla zdrowia człowieka jakie niesie ze sobą hipoksja i hiperbaria, a szczególnie hiperbaria tlenowa. W zasadzie poza koniecznością eliminacji z pobytu w przestrzeni komory osób cierpiących na klaustrofobię należy liczyć się tylko z jednym następstwem zdrowotnym. Chodzi tu o wzmogoną generację reaktywnych form tlenu i wolnych rodników. Jest to związane z większą niż w powietrzu atmosferycznym dostępnością tlenu [45]. To szkodliwe dla komórek (w tym dla DNA) zjawisko jest nierozdzielnie związane z hiperbarią tlenową czy hiperoksją. Może przyczynić się m.in. do rozwoju chorób układu krążenia, chorób układu oddechowego, niektórych schorzeń narządu wzroku czy zwiększać ryzyko karcynogenezy [46].

Biorąc powyższe pod uwagę, można zatem pokusić się o stwierdzenie, że ekspozycja w komorach hiperbarycznych może mieć działanie „pro – aging” zamiast szeroko reklamowanego „antyaging”. Natomiast w normobarii wzrost produkcji wolnych rodników będzie niewielki z uwagi na wartości ciśnienia parcjalnego tlenu w proponowanej mieszaninie oddechowej [47]. Z tego powodu łatwe będzie całkowite zniesienie negatywnego efektu za pomocą właściwej, zbilansowanej diety stosowanej równolegle z ekspozycjami normobarycznymi [48].

PODSUMOWANIE

Z uwagi na bezpieczeństwo stosowania, brak efektów ubocznych, korzyści zdrowotne, mniejsze wymogi w zakresie kwalifikacji personelu obsługi oraz dostępność, normobaria w zmienionym środowisku mieszaniny gazowej wydaje się racjonalnym wyborem. Nie można także nie wspomnieć o zdecydowanie niższych kosztach przy osiągnięciu zbliżonych efektów szczególnie w zakresie zastosowań niemedycznych.

BIBLIOGRAFIA

1. Heyboer M., III, Sharma D., Santiago W., McCulloch N. Hyperbaric oxygen therapy: Side effects defined and quantified. *Adv. Wound Care*. 2017;6:210–224. Doi: 10.1089/wound.2016.0718.
2. Rocco M., D'Itri L., De Bels D., Corazza F., Balestra C. The “normobaric oxygen paradox”: A new tool for the anesthetist? *Minerva. Anestesiol*. 2014;80:366–372
3. Kujawski S, Stomko J, Morten KJ, Murovska M, Buszko K, Newton JL, Zalewski P. Autonomic and Cognitive Function Response to Normobaric Hyperoxia Exposure in Healthy Subjects. Preliminary Study. *Medicina (Kaunas)*. 2020 Apr 10;56(4):172. Doi: 10.3390/medicina56040172. Erratum in: *Medicina (Kaunas)*. 2024 Feb 01;60(2):255. Doi: 10.3390/medicina60020255.
4. Shi SH, Qi ZF, Luo YM, Ji XM, Liu KJ. Normobaric oxygen treatment in acute ischemic stroke: a clinical perspective. *Med. Gas Res*. 2016 Oct 14;6(3):147-153. Doi: 10.4103/2045-9912.191360.
5. Horncastle E, Lumb AB. Hyperoxia in anaesthesia and intensive care. *BJA Educ*. 2019 Jun;19(6):176-182. Doi: 10.1016/j.bjae.2019.02.005.
6. Brueckl C, Kaestle S, Kerem A, et al. Hyperoxia-induced reactive oxygen species formation in pulmonary capillary endothelial cells in situ. *Am J Respir Cell Mol Biol*. 2006;34:453–463.
7. Thom SR. Hyperbaric oxygen therapy. *J Intensive Care Med*. 1989;4:58–74
8. Pejic W, Frey N. Hyperbaric Oxygen Therapy for the Treatment of Chronic Pain: A Review of Clinical Effectiveness and Cost-Effectiveness [Internet]. Ottawa (ON): Canadian Agency for Drugs and Technologies in Health; 2018 Sep 17.
9. Basharat S, Spry C. Hyperbaric Oxygen Therapy: An Emerging Therapy for Post-COVID-19 Condition: CADTH Horizon Scan [Internet]. Ottawa (ON): Canadian Agency for Drugs and Technologies in Health; 2023 Aug. Report No.: EN0050.
10. Mathieu D, Marroni A, Kot J. Tenth European Consensus Conference on Hyperbaric Medicine: recommendations for accepted and non-accepted clinical indications and practice of hyperbaric oxygen treatment. *Diving Hyperb Med*. 2017 Mar;47(1):24-32. doi: 10.28920/dhm47.1.24-32. Erratum in: *Diving Hyperb Med*. 2017 Jun;47(2):131-132. doi: 10.28920/dhm47.2.131-132.
11. Hoiland, R. L. , Fisher, J. A. , & Ainslie, P. N. (2019). Regulation of the cerebral circulation by arterial carbon dioxide. *Comprehensive Physiology*, 9(3), 1101–1154.
12. Tancredi, F. B. , & Hoge, R. D. (2013). Comparison of cerebral vascular reactivity measures obtained using breath-holding and CO2 inhalation. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism*, 33(7), 1066–1074.

13. Cyr-Kirk S, Billaut F. Hyperoxia Improves Repeated-Sprint Ability and the Associated Training Load in Athletes. *Front Sports Act Living*. 2022 Mar 11;4:817280. doi: 10.3389/fspor.2022.817280.
14. Park, S. H., Park, S. J., Shin, M. S., and Kim, C. K. (2018). The effects of low-pressure hyperbaric oxygen treatment before and after maximal exercise on lactate concentration, heart rate recovery, and antioxidant capacity. *J. Exerc. Rehabil.* 14, 980–984. doi: 10.12965/jer.1836468.234
15. Yamazaki F, Takahara K, Sone R, Johnson JM. Influence of hyperoxia on skin vasomotor control in normothermic and heat-stressed humans. *J Appl Physiol* (1985). 2007 Dec;103(6):2026-33. doi: 10.1152/jappphysiol.00386.2007.
16. Sperlich, B., Zinner, C., Hauser, A., Holmberg, H. C., and Wegrzyk, J. The impact of hyperoxia on human performance and recovery. *Sports Med*. 2017;47, 429–438.
17. Yokoi Y, Yanagihashi R, Morishita K, Fujiwara T, Abe K. Effects of exposure to normobaric hyperoxia on the recovery of local muscle fatigue in the quadriceps femoris of young people. *J Phys Ther Sci*. 2014 Mar;26(3):455-60. Doi: 10.1589/jpts.26.455.
18. Berner, R.A. Atmospheric oxygen over Phanerozoic time. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 1999, 96, 10955–10957.
19. Butterfield, N.J. Oxygen, animals and oceanic ventilation: An alternative view. *Geobiology* 2009, 7, 1–7
20. Taccone FS, Crippa IA, Vincent JL. Normobaric hyperoxia after stroke: a word of caution. *Expert Rev Neurother*. 2018 Feb;18(2):91-93. Doi: 10.1080/14737175.2018.1414600.
21. Qi Z, Liu W, Luo Y, et med. Normobaric hyperoxia-based neuroprotective therapies in ischemic stroke. *Med. Gas Res*. 2013;3:2
22. Scholey AB et al. Cognitive performance, hyperoxia and heart rate following oxygen administration in healthy young adults. *Physiol. Behav.* 1999, 67, 5, 783-789 [https://doi.org/10.1016/S0031-9384\(99\)00183-3](https://doi.org/10.1016/S0031-9384(99)00183-3)
23. Singer M, Young PJ, Laffey JG, Asfar P, Taccone FS, Skrifvars MB, Meyhoff CS, Radermacher P. Dangers of hyperoxia. *Crit Care*. 2021 Dec 19;25(1):440. doi: 10.1186/s13054-021-03815-y.
24. Bennett MH, French C, Schnabel A, Wasiak J, Kranke P, Weibel S. Normobaric and hyperbaric oxygen therapy for the treatment and prevention of migraine and cluster headache. *Cochrane Database Syst Rev*. 2015 Dec 28;2015(12):CD005219. doi: 10.1002/14661858.
25. Ward KR, Yealy DM. End-tidal carbon dioxide monitoring in emergency medicine, Part 1: Basic principles. *Acad Emerg Med*. 1998 Jun;5(6):628-36. doi: 10.1111/j.1553-2712.1998.tb02473.x.
26. Zhai X, Chen X, Ohta S, Sun X. Review and prospect of the biomedical effects of hydrogen. *Med Gas Res*. 2014 Nov 29;4(1):19. doi: 10.1186/s13618-014-0019-6.
27. Barron AR. Chemistry of the Main Group Elements. <https://chem.libretexts.org/@go/page/417162>
28. Hill DB, Button B, Rubinstein M, Boucher RC. Physiology and pathophysiology of human airway mucus. *Physiol Rev*. 2022 Oct 1;102(4):1757-1836. doi: 10.1152/physrev.00004.2021. Epub 2022 Jan 10.
29. Hadanny A, Efrati, S. The Hyperoxic-Hypoxic Paradox. *Biomolecules* 2020, 10, 958. <https://doi.org/10.3390/biom10060958>
30. Whipp BJ. Physiological mechanisms dissociating pulmonary CO2 and O2 exchange dynamics during exercise in humans. *Exp Physiol*. 2007 Mar;92(2):347-55. doi: 10.1113/expphysiol.2006.034363.
31. Hickey SM, Sankari A, Giwa AO. Mechanical Ventilation. 2024 Mar 30. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 Jan–.
32. Benner A, Patel AK, Singh K, Dua A. Physiology, Bohr Effect. 2023 Aug 8. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 Jan–.
33. Fukui T. Physiology of respiratory system and oxygen-carbon dioxide transport mechanism. *Nihon Rinsho*. 1981 Nov;39(11):3406-13.
34. Orbegozo Cortés D, Puflea F, et al. Normobaric hyperoxia alters the microcirculation in healthy volunteers. *Microvasc Res*. 2015;98:23–28.
35. Cierznikowska K, Kozłowska E, Popow A, Sprengel K, Reszczyński M, Grzelakowski P. The use of vacuum therapy in wound healing after cardiac surgery. *Leczenie Ran*. 2020;79-87. doi:10.5114/lr.2020.99066.
36. Zieliński E., Grobelska K., Dziegielewska P., i Olszański R., Leczenie rany przewlekłej : opis przypadku pacjenta leczonego w Centrum Hiperbarii Tlenowej i Leczenia Ran w Bydgoszczy, [w:] Postępy medycyny podwodnej i hiperbarycznej, red. R. Olszański, 2018, s. 409–416.
37. Ishihara, A. (2019). Mild hyperbaric oxygen: mechanisms and effects. *J. Physiol. Sci.* 69, 573–580.
38. Brugniaux JV, Coombs GB, Barak OF, Dujic Z, Sekhon MS, Ainslie PN. Highs and lows of hyperoxia: physiological, performance, and clinical aspects. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*. 2018 Jul 1;315(1):R1-R27. doi: 10.1152/ajpregu.00165.2017.
39. Balestra C, Lambrechts K, Mrakic-Sposta S, Vezzoli A, Levenez M, Germonpré P, Virgili F, Bosco G, Lafère P. Hypoxic and Hyperoxic Breathing as a Complement to Low-Intensity Physical Exercise Programs: A Proof-of-Principle Study. *Int J Mol Sci*. 2021 Sep 4;22(17):9600. doi: 10.3390/ijms22179600.
40. Wang Z, Spielmann G, Johannsen N, Greenway F, Irving BA, Dalecki M. Boost your brain: a simple 100% normobaric oxygen treatment improves human motor learning processes. *Front Neurosci*. 2023 Jul 11;17:1175649. doi: 10.3389/fnins.2023.1175649
41. Shaw DM, Bloomfield PM, Gant N. The effect of acute normobaric hyperoxia on cognition: A systematic review, meta-analysis and meta-regression. *Physiology & Behavior*, 267, 2023,114208, doi: <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2023.114208>
42. Shariffi B, Lloyd IN, Cessac ME, Harper JL, Limberg JK. Reproducibility and diurnal variation in middle cerebral artery blood velocity in healthy humans. *Exp Physiol*. 2023 May;108(5):692-705. doi: 10.1113/EP090873.
43. Brem H, Tomic-Canic M. Cellular and molecular basis of wound healing in diabetes. *J Clin Invest*. 2007 May;117(5):1219-22. doi: 10.1172/JCI32169.
44. Bloch Y, Belmaker RH, Shvartzman P, Romem P, Bolotin A, Bersudsky Y, Azab AN. Normobaric oxygen treatment for mild-to-moderate depression: a randomized, double-blind, proof-of-concept trial. *Sci Rep*. 2021 Sep 23;11(1):18911. doi: 10.1038/s41598-021-98245-9
45. Kozakiewicz M, Kedziora-Kornatowska K, Kaczerska D, Siermontowski P, Olszanski R, Krefft K. Influence of exposure in hyperbaric chambers on selected parameters of oxidative stress in professional divers. *Undersea Hyperb Med*. 2018;45(1):49-54.
46. Gröger M, Oter S, Simkova V, Boltan M, Koch A, Warninghoff V, Georgieff M, Muth CM, Speit G, Radermacher P. DNA damage after long-term repetitive hyperbaric oxygen exposure. *J Appl Physiol* (1985). 2009 Jan;106(1):311-5. doi: 10.1152/jappphysiol.90737.2008.
47. Alva R, Mirza M, Baiton A, Lazuran L, Samokysh L, Bobinski A, Cowan C, Jaimon A, Obioru D, Al Makhoul T, Stuart JA. Oxygen toxicity: cellular mechanisms in normobaric hyperoxia. *Cell Biol Toxicol*. 2023 Feb;39(1):111-143. doi: 10.1007/s10565-022-09773-7.
48. Görlach A., Dimova E.Y., Petry A., Martínez-Ruiz A., Hernansanz-Agustín P., Rolo A.P., Palmeira C.M., Kietzmann T. Reactive oxygen species, nutrition, hypoxia and diseases: Problems solved? *Redox Biol*. 2015;6:372–385. doi: 10.1016/j.redox.2015.08.016.

dr n. med. Gabriela Henrykowska
 Zakład Epidemiologii i Zdrowia Publicznego,
 Uniwersytet Medyczny w Łodzi
 gabriela.henrykowska@umed.lodz.pl

