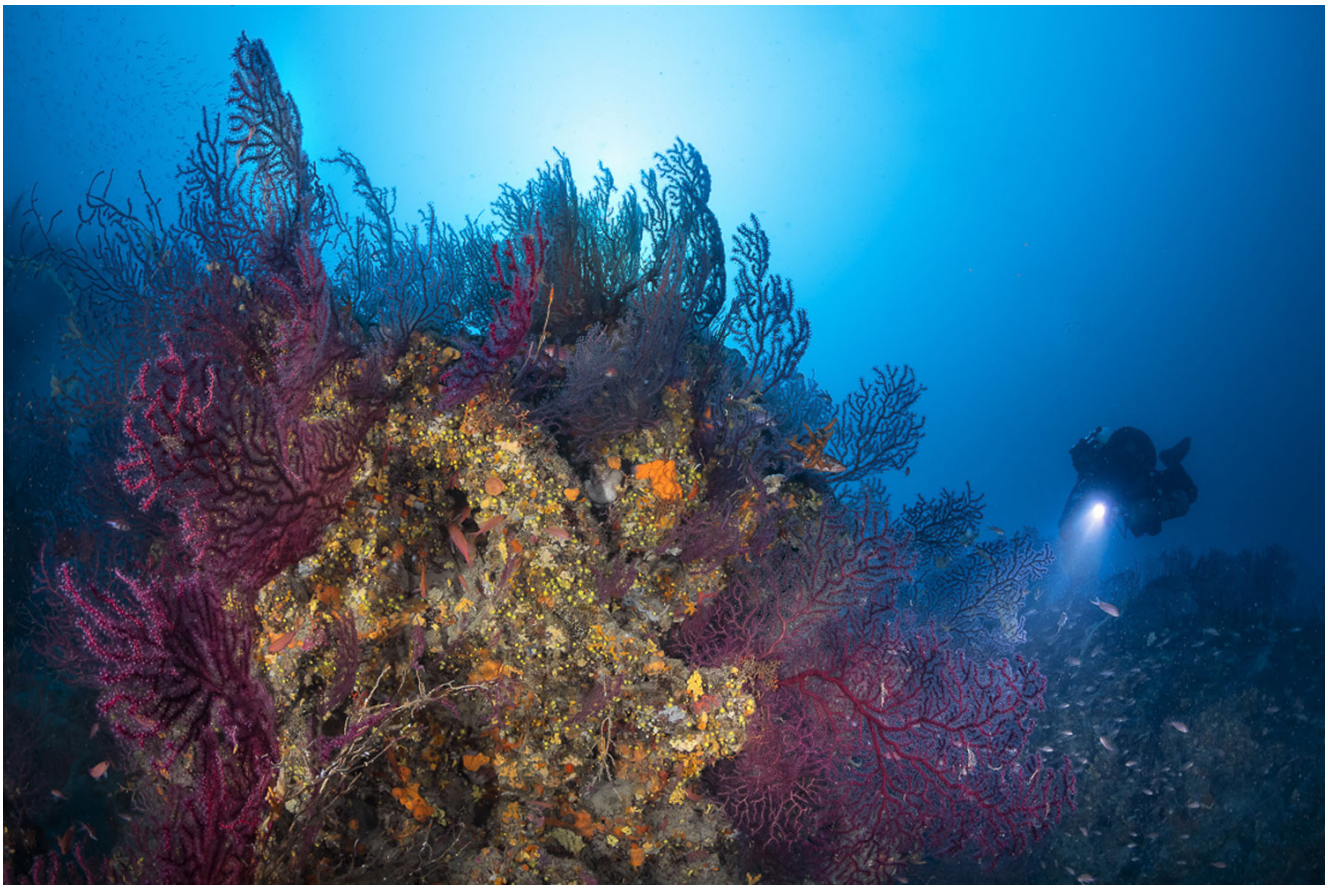
Pomiar narkozy gazowej

Narkoza gazów obojętnych została przez Jacques'a Cousteau określona poetycką nazwą „ekstaza głębin". Mimo że wciąż nie do końca rozumiemy mechanizm jej powstawania i skutki, jest ona od wielu lat uznawana za główny czynnik ryzyka wpływający na bezpieczeństwo nurków. Tak naprawdę u nurków rekreacyjnych istnieje o wiele większe prawdopodobieństwo wystąpienia narkozy azotowej, jako jednej formy narkozy gazów obojętnych, niż choroby dekompresyjnej lub zatorów gazowych. Chociaż udowodniono, że nurkowie nie rozwijają tolerancji na narkozę, do pewnego stopnia mogą jednak nauczyć się radzić sobie z nią.

W początkowym okresie rozwoju nurkowania narkoza azotowa była głównym czynnikiem ograniczającym głębokość nurkowań do 30-40 metrów. Jeśli nurkowie chcieli zejść na większą głębokość, musieli samodzielnie radzić sobie ze wzrastającym wpływem narkozy. Obecnie dzięki możliwości stosowania mieszanin oddechowych, ryzyko związane z narkozą można łatwo zminimalizować.



Istnieje jednak duża różnica zdań odnośnie tego, jak duży wpływ narkozy możeby traktować jako bezpieczny, na ile można ją kontrolować i czy tlen również przyczynia się do zwiększenia właściwości narkotycznych innych gazów oddechowych (np. azotu, helu). Z tego powodu **praktyki w społecznościach nurków rekreacyjnych różnią się od siebie.**

Głównym wyzwaniem w badaniu narkozy gazowej jest brak obiektywnych, wiarygodnych narzędzi pomiarowych, które pozwoliłyby określić początek i intensywność narkozy. Udowodniono, że ocena subiektywnych symptomów przez nurków nie jest miarodajna a tradycyjne testy psychologiczne trudno jest przeprowadzić pod wodą.

Niemniej jednak w ostatnim dziesięcioleciu badacze DAN Europe opublikowali serię artykułów na temat

skuteczności nowego narzędzia do oceny funkcji poznawczych nurka zwanego "krytyczną częstotliwością migotania" (Critical Flicker Fusion Frequency – CFFF), które wydaje się obiektywnie mierzyć narkozę i jest proste do wykorzystania.

W tej pracy skupiamy się na dwóch artykułach opisujących zaskakujące, nowe spostrzeżenia na temat narkozy. Pierwszy z nich, opublikowany w 2016 roku pod tytułem "Do Environmental Conditions Contribute to Narcosis Onset and Symptom Severity?" opisuje badania nad wpływem różnych warunków hiperbarycznych na narkozę. Autorzy stwierdzili, że ciśnienie otoczenia i gazy oddechowe mogą być jedynymi zewnętrznymi czynnikami, które na nią wpływają. Odkryto również, że narkoza zaczyna się od większego pobudzenia umysłowego przy zanurzaniu, które trwa przez krótki czas oraz że jej wpływ utrzymuje się przez co najmniej 30 minut po nurkowaniu.

W drugim artykule "Early detection of diving-related cognitive impairment of different nitrogen-oxygen gas mixtures using critical flicker fusion frequency" badacze porównali narkozę gazową podczas nurowań na powietrzu i na nitroksie za pomocą CFFF i tradycyjnych testów psychologicznych. Stwierdzili oni, że wyższe ciśnienie parcjalne tlenu w nitroksie może mieć działanie łagodzące wpływ narkozy.

Czym jest częstotliwość migotania

Krytyczna częstotliwość migotania (Critical Flicker Fusion Frequency – CFFF) to częstotliwość, przy której migające światło jest postrzegane jako stałe. Ten rodzaj testu został opracowany na początku XX wieku do badań na fizjologią widzenia i od tego momentu stał się ważnym narzędziem mierzenia pobudzenia umysłowego w różnych warunkach, takich jak np. zmiany patologiczne, anestezja czy narażenie zawodowe w lotnictwie.

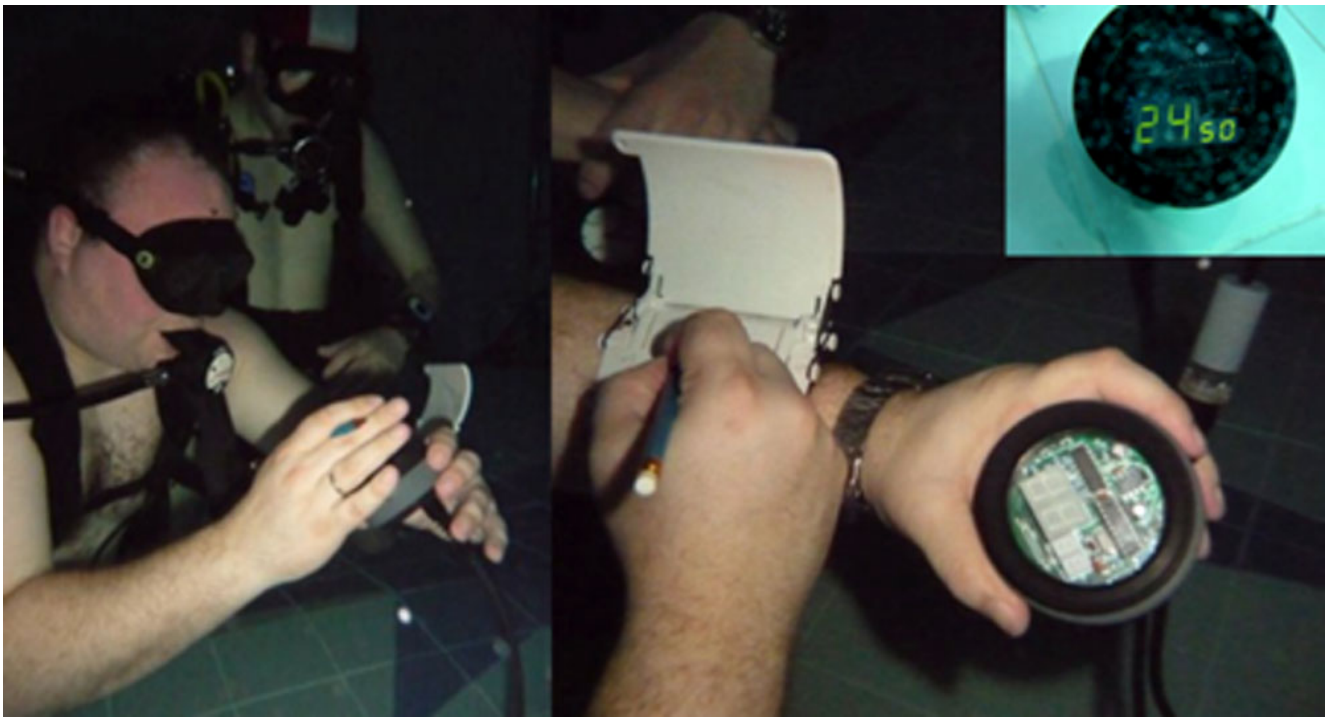
W miarę, jak funkcje kognitywne u danej osoby stają się coraz bardziej upośledzone lub słabną, zmniejsza

się częstotliwość, przy którym ta osoba przestaje widzieć migotanie i zaczyna widzieć światło stałe („częstotliwość krytyczna”). Z drugiej strony, w sytuacji zwiększonego pobudzenia umysłowego częstotliwość krytyczna wzrasta. Ponieważ różne osoby widzą różne częstotliwości, bazowa częstotliwość krytyczna danej osoby jest określana jako 100%, a wyniki pomiaru CFFF przedstawiane są jako odsetek tej częstotliwości.

Założyciel DAN USA, Dr Peter Bennett po raz pierwszy opisał korelację pomiędzy stanem umysłowym nurków, CFFF i badaniem elektrokardiograficznym (EEG) w roku 1960. W kolejnych badaniach stwierdził on, że zmiany CFFF podczas saturacji helioksem odzwierciedlają mniej więcej zmiany w EEG. Niestety późniejsi badacze nie byli w stanie powtórzyć tych wyników i zrezygnowano z używania CFFF.

Niedawno naukowcy z DAN ponownie zainteresowali się tą metodą pomiaru i przedstawili obiecujące wyniki. Udowodnili oni, że testy CFFF dają możliwość przeprowadzenia wiarygodnych pomiarów pod wodą (2012) i pozwalają na ocenę funkcji poznawczych nurka w podobny sposób, jak testy stworzone w systemie Psychology Experiment Building Language (PEBL), kiedy nurek oddycha powietrzem i tlenem pod ciśnieniem atmosferycznym (2014).

Badanie CFFF jest generalnie łatwiejsze do przeprowadzenia pod wodą niż test PEBL i prawdopodobnie nurek ma mniejszą możliwość manipulacji wyniku. Wykonuje się je przy pomocy małego urządzenia w kształcie walca wyposażonego w niebieską diodę LED i obracający się pierścień, który zmienia częstotliwość migotania. Podczas testu nurek patrzy bezpośrednio na diodę, a badacz zwiększa lub zmniejsza tę częstotliwość. Kiedy nurek zauważy, że światło diody zmienia się z migającego na stałe, test zostaje zakończony, a badacz notuje częstotliwość migotania. Ten wynik zostaje następnie porównany z wynikiem badania CFFF wykonanego przed nurkowaniem, który określa częstotliwość bazową dla danej osoby. W tym przypadku większa częstotliwość migotania oznacza zwiększenie poziomu funkcji poznawczych, natomiast mniejsza częstotliwość została uznana za dowód na wystąpienie narkozy azotowej.

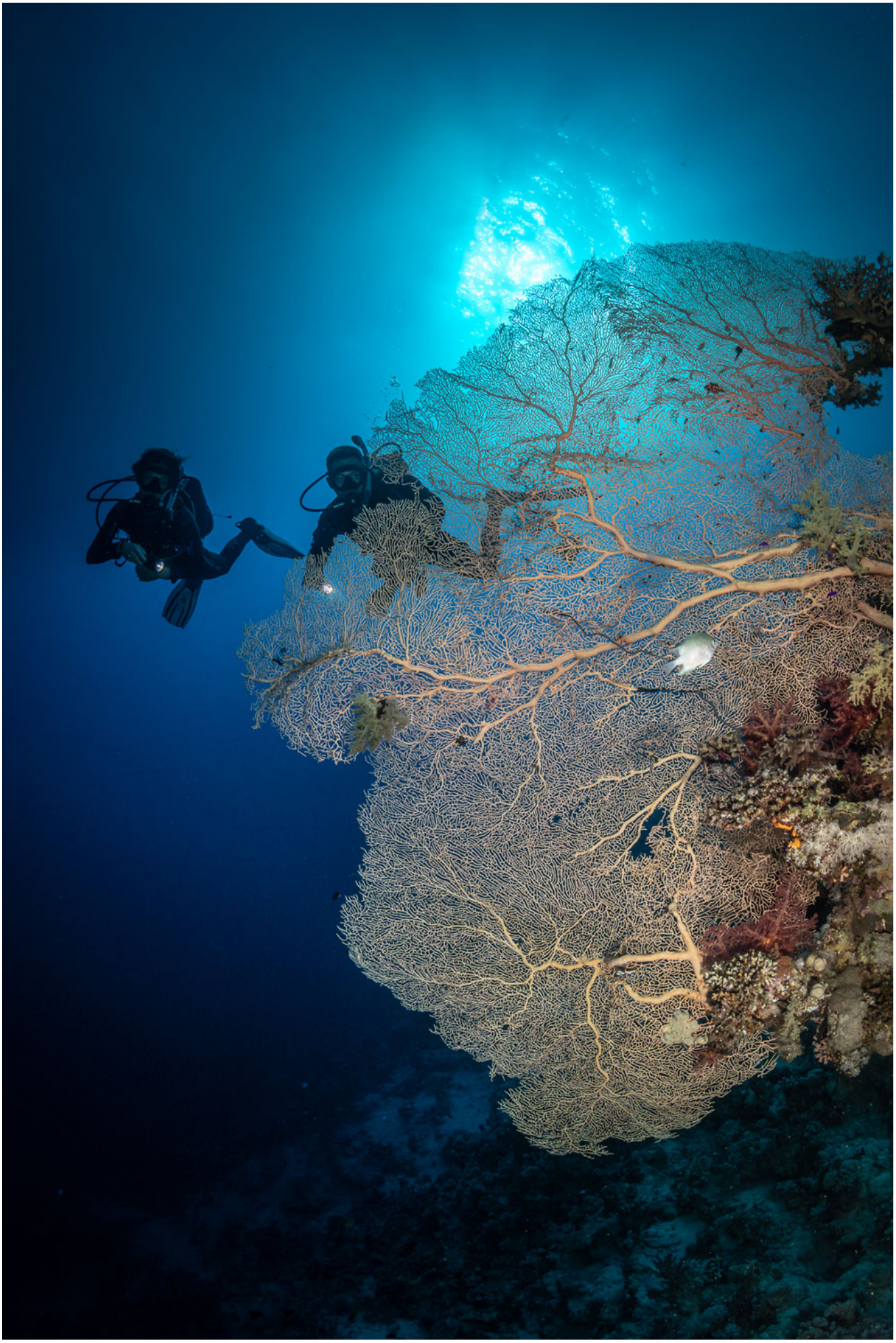


Jak ważne jest środowisko?

Ponieważ nurkowie przystosowują się do przebywania pod wodą, powszechnie uznaje się, że samo środowisko prawdopodobnie wpływa na ich zachowanie ze względu na połączenie różnych czynników. Podobnie badacze sądzą, że wiele czynników wpływa na występowanie i nasilenie narkozy gazowej.

Po pierwsze wyższe ciśnienie parcjalne dwutlenku węgla (PCO_2) występujące przy zwiększonym wysiłku spowodowanym obciążeniem, męczącym pływaniem w płetwach i szybszym oddychaniem jest głównym czynnikiem rozważanym przez naukowców. Uważają oni, że wyższe PCO_2 rozszerza mózgowe naczynia krwionośne, przez co wzrasta poziom azotu w mózgu. Prawdopodobnym czynnikiem jest również zimno, ponieważ powoduje ono obkurczenie się naczyń obwodowych. Naczynia w mózgu nie mają jednak zdolności obkurczenia się pod wpływem zmiany temperatury, przez co do mózgu dociera więcej azotu.

Uważa się, że wpływ na narkozę azotową mają również inne czynniki, takie jak picie alkoholu, używanie narkotyków lub leków, kac, zmęczenie, niepokój, przeładowanie zadaniami, stres, ograniczona widoczność, prędkość wynurzania, vertigo i dezorientacja w przestrzeni. Z naukowego punktu widzenia nie ma jednak szczególnie mocnych dowodów na wpływ tych czynników i potrzebne są dodatkowe dane. Z tego względu pierwsze badanie opisane poniżej dotyczyło wpływu środowiska nurkowania.



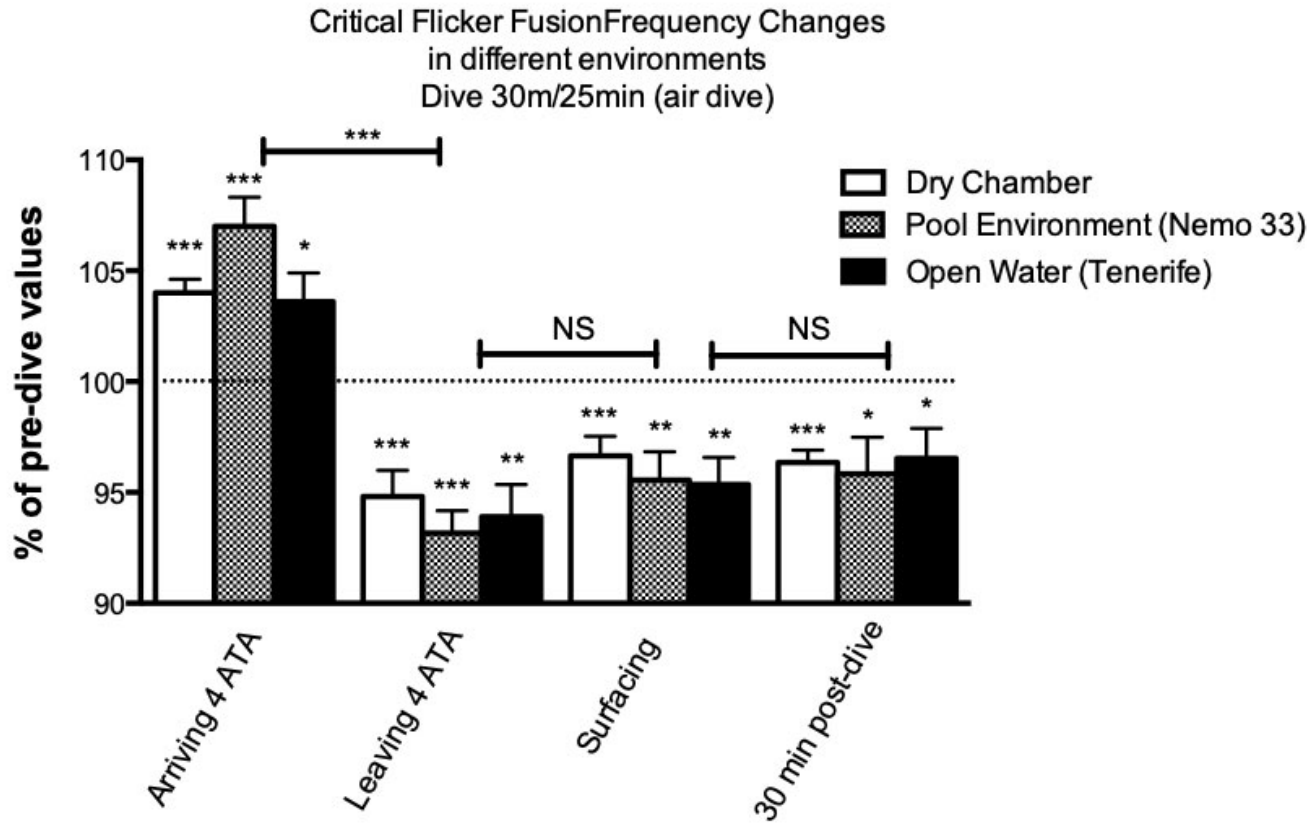
Badacze zrekrutowali jednorodną grupę uczestników: 40 mężczyzn w wieku 30-40 lat, niepalących, regularnie uprawiających ćwiczenia fizyczne, których wskaźnik masy ciała (BMI) wynosił 20-25. Ochotnicy nie pili alkoholu przez 72 godziny przed badaniem.

Nurkowania zostały przeprowadzone w trzech różnych środowiskach: komora hiperbaryczna, głęboka część basenu Nemo 33 oraz wody otwarte w oceanie. Głębokość tych nurkowań wynosiła 30 metrów, czas na dnie 20 minut. Woda w basenie miała temperaturę 33°C, zatem uczestnicy nie potrzebowali ochrony przed zimnem. Temperatura wody w oceanie wynosiła 19°C i nurkowie mieli na sobie odpowiednie mokre skafandry.

Na potrzeby każdego nurkowania przeprowadzono serię pięciu pomiarów CFFF:

- Przed nurkowaniem, aby określić częstotliwość bazową dla każdego uczestnika
- Po dotarciu na głębokość 30 metrów
- Pięć minut przed wynurzeniem na powierzchnię
- Tuż po wynurzeniu na powierzchnię
- Trzydzieści minut po nurkowaniu

Według autorów eksperymentu po raz pierwszy zmierzono wpływ narkozy w standardowej populacji w różnych warunkach środowiska: w wodzie/w komorze hiperbarycznej, w skafandrze nurkowym/bez skafandra oraz w wodzie otwartej bez punktu odniesienia/w basenie. Wyniki badania są zaskakujące.



Jak pokazano na ilustracji 1 wyniki pomiaru CFFF były niezwykle spójne dla każdego z tych trzech środowisk. Najpierw wartość CFFF nurków wzrosła po dotarciu do ustalonej głębokości, co świadczy o zwiększeniu funkcji poznawczych. Po 15 minutach nastąpił wyraźny spadek wartości CFFF i ograniczenie funkcji poznawczych, prawdopodobnie dlatego, że zaczęła na nie wpływać narkoza gazowa. Co ciekawe, to ograniczenie utrzymywało się po wynurzeniu na powierzchni i 30 minut po nurkowaniu.

Ten fakt sugeruje, że stara zasada, która zaleca wynurzenie się o kilka metrów, jeśli czujemy wpływ narkozy może być nieefektywną strategią. Również zaskakujący był początkowy wzrost wartości CFFF po zanurzeniu na ustaloną głębokość, co świadczy o zwiększonym pobudzeniu umysłowym.

Według badaczy te spostrzeżenia są spójne z białkową teorią narkozy, która w ostatnich czasach zyskuje coraz więcej zwolenników. Uważa się, że to ona jest odpowiedzialna za występowanie narkozy gazowej, a nie teoria lipidowa znieczulenia ogólnego Overtona i Meyera, choć możliwe jest, że oba te mechanizmy mają wpływ na narkozę. Tak naprawdę uważa się, że narkoza gazowa i znieczulenie wykorzystują te same mechanizmy.

Autorzy badania stawiają hipotezę, że zaobserwowane zwiększenie, a następnie ograniczenie pobudzenia umysłowego wynika z równowagi między bezpośrednim „narkotycznym" wpływem azotu i tlenu na receptory GABA a farmakokinetyką tych interakcji. Tlen ma działanie pobudzające neuroprzekaźniki, natomiast azot ma działanie hamujące (zobacz: Rostain et al. 2011; Balestra et al. 2018).

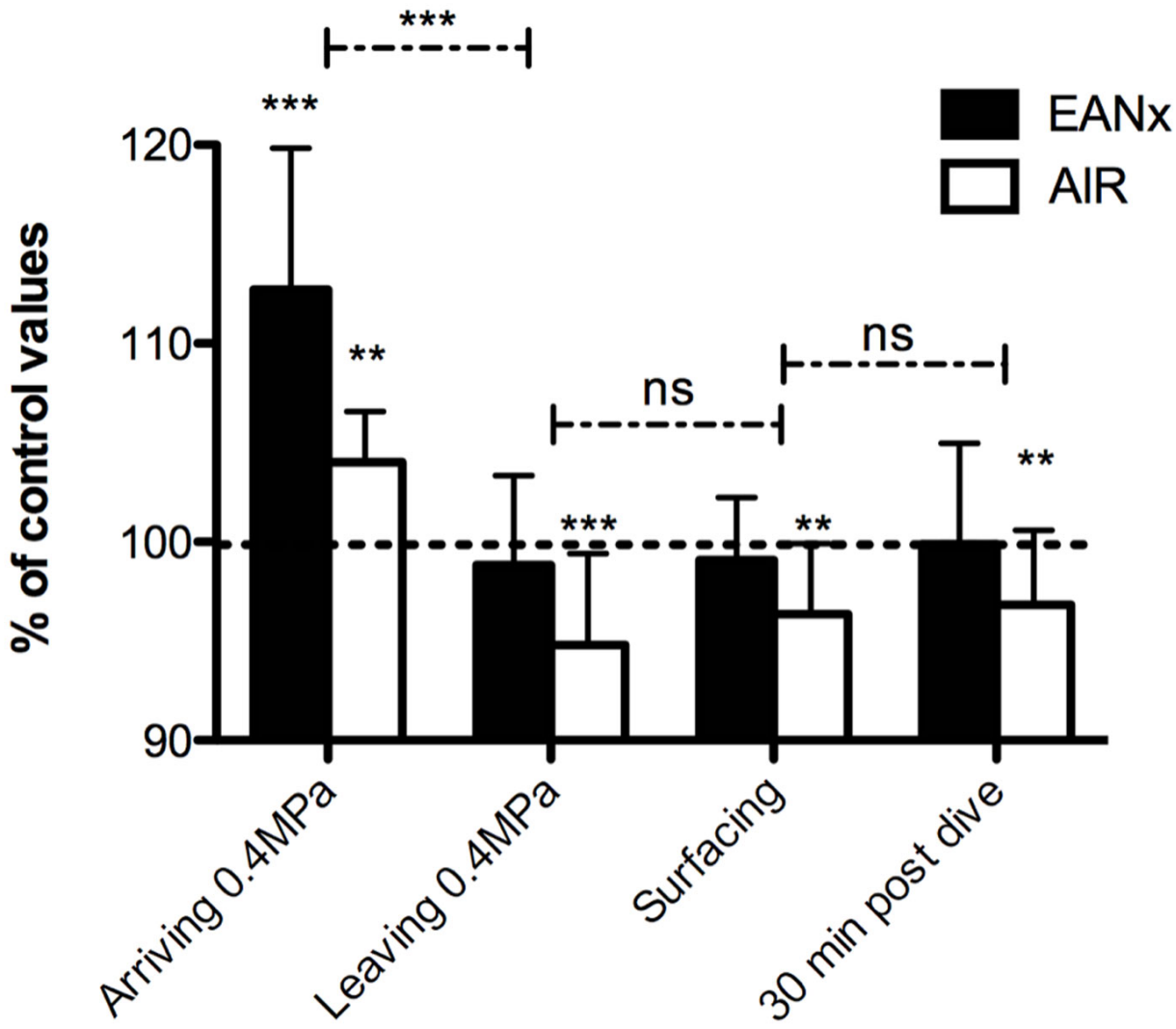
Autorzy doszli do wniosku, że przy obiektywnej metodzie pomiaru, ciśnienie i gaz mogą być jedynymi zewnętrznymi czynnikami, które mają wpływ na narkozę azotowa. Podczas badania nie uwzględniono jednak wpływu wysiłku fizycznego (który jest odpowiedzialny np. za większy poziom PCO_2). Badacze twierdzą, że istnieje duże prawdopodobieństwo, iż wysiłek również jest czynnikiem krytycznym.

Powietrze kontra nitroks

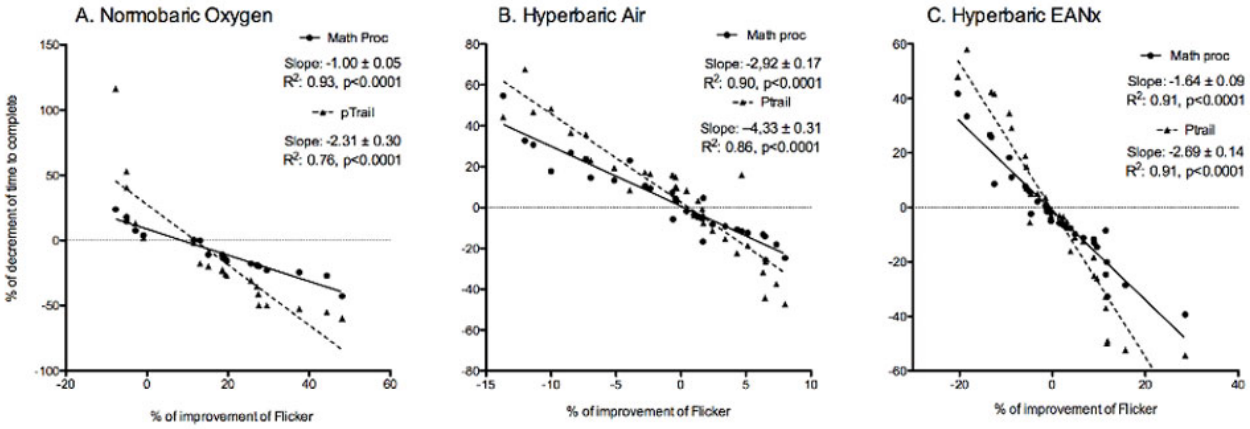
Przeprowadzono kilka porównywalnych badań dotyczących wpływu powietrza i nitroksu (EAN) na narkozę azotową. Wyniki niektórych z nich wskazują na ograniczenie funkcji psychomotorycznych podczas oddychania O_2 lub EANx. Inne badania wykazały, że narkotyczny wpływ gazów jest taki sam, choć nurkowie mogą to odbierać inaczej. Celem tego badania jest lepsze zrozumienie wpływu, jakie ma oddychanie mieszaninami o różnym ciśnieniu parcjalnym tlenu na funkcje poznawcze i sprawdzenie efektywności CFFF jako narzędzia stosowanego do pomiarów.

Do tego badania wybrano ośmiu nurków. Ponownie byli to mężczyźni w wieku 30-40 lat, których BMI mieściło się w granicach 20-25. Nurkowania testowe zostały przeprowadzone na powietrzu lub EANx 40 w losowej kolejności w komorze dekompresyjnej, gdzie gazy były dostarczane nurkom przez maskę pełnotwarzową. Profil nurkowy został opracowany tak, aby wywołać narkozę: głębokość 30 metrów lub ciśnienie 4 ATA, czas na dnie 22 minuty, 12 minut dekompresji liniowej z wynurzaniem co 3 metry na minutę i przystankiem bezpieczeństwa na głębokości 3 metry przez 3 minuty.

Funkcje poznawcze nurka zostały ocenione za pomocą urządzenia testującego CFFF i skomputeryzowanego zestawu testów PEBL, który obejmuje przetwarzanie działań matematycznych, wyszukiwanie liczb od najmniejszej do największej i test spostrzegawczości. Podobnie jak w przypadku poprzedniego badania, pomiary przeprowadzono kilka razy: przed nurkowaniem, gdy nurkowie znaleźli się pod ciśnieniem 4 ATA, przy rozpoczęciu wynurzenia z ciśnienia 4 ATA, po wynurzeniu na powierzchnię i 30 minut po nurkowaniu.



Na ilustracji 2 widać, że zmiany w wartościach CFFF dla powietrza i EANx tworzą podobny schemat, jak w przypadku pierwszego badania. Kiedy nurek oddychał powietrzem, jego wartości CFFF wzrastały do momentu, gdy znalazł się on pod ciśnieniem 4 ATA, po czym 15 minut później spadły. Ograniczenie funkcji poznawczych utrzymywało się po wynurzeniu na powierzchnię i 30 minut po nurkowaniu. Kiedy nurek oddychał nitroksem, wartości CFFF wzrastały do momentu dotarcia do ustalonej głębokości i spadły po 15 minutach, ale po tym spadku nastąpił powrót do wartości bazowej.



Ilustracja 3 pokazuje znaczącą odwrotną korelację między zmianami w wartościach CFFF a czasem potrzebnym do ukończenia testów PEBL dla obydwu mieszanin gazów. Tak samo jak w przypadku wartości CFFF, po dotarciu na ustaloną głębokość nurkowie potrzebowali mniej czasu na ukończenie testu niezależnie od tego, czy oddychali powietrzem czy nitroksem. Jednak w miarę kontynuowania nurkowania, ten czas był gorszy (dłuższy) i ta tendencja utrzymywała się 30 minut po nurkowaniu. To badanie potwierdziło, że CFFF jest trafnym narzędziem pomiaru w warunkach hiperbarycznych i daje podobne wyniki jak testy PEBL.

Skompresowane powietrze nadaje się do opon?

Chociaż schemat zmian wywołanych przez oba gazy jest podobny, istnieje między nimi zasadnicza różnica. U nurków oddychających EANx zaobserwowano większą aktywację mózgu i mniejsze ograniczenie funkcji poznawczych w dalszej części nurkowania/po nurkowaniu niż u nurków oddychających powietrzem. Te wyniki są spójne z wynikami pierwszego badania dotyczącego warunków środowiska.

Autorzy wysunęli hipotezę, że wyższy procent wdychanego tlenu ma korzystny wpływ na poziom pobudzenia i wykorzystanie funkcji poznawczych. Zostało to udowodnione w innych badaniach dotyczących oddychania tlenem. Jest również możliwe, że nurkowie podatni na narkozę gazową mogą być również podatni na wpływ wyższego poziomu PO_2. Dodatkowo okazało się, że nawet niewielkie zmniejszenie poziomu PN_2 w poprzednim badaniu (oddychanie EANx28 czyli nitroksem z zawartością 28% tlenu) miało korzystny wpływ na wykonywanie zadań sprawdzających funkcje poznawcze.

Wniosek? Badanie potwierdza, że jest trochę prawdy w sloganie stworzonym przez Global Underwater Explorers (GUE): „Sprężone powietrze nadaje się do opon”. Nie tylko jest bardziej prawdopodobne, że nurkowie doświadczą mniejszej narkozy gazowej nurkując na nitroksie niż na powietrzu, ale nitroks daje również korzyści podczas dekompresji.

Kluczowa bibliografia

Rocco M, Pelaia P, Di Benedetto P, Conte G, Maggi L, Fiorelli S, Mercieri M, Balestra C, De Blasi RA & Investigators RP. (2019). Inert gas narcosis in scuba diving, different gases different reactions. *Eur J Appl Physiol* 119, 247-255.

Lafere P, Hemelryck W, Germonpre P, Matity L, Guerrero F & Balestra C. (2019). Early detection of diving-related cognitive impairment of different nitrogen-oxygen gas mixtures using critical flicker fusion frequency. *Diving Hyperb Med* 49, 119-126.

Balestra C, Machado ML, Theunissen S, Balestra A, Cialoni D, Clot C, Besnard S, Kammacher L, Delzenne J, Germonpre P & Lafere P. (2018). Critical Flicker Fusion Frequency: A Marker of Cerebral Arousal During Modified Gravitational Conditions Related to Parabolic Flights. *Front Physiol* 9, 1403.

Lafere P, Balestra C, Hemelryck W, Guerrero F & Germonpre P. (2016). Do Environmental Conditions Contribute to Narcosis Onset and Symptom Severity? *International journal of sports medicine* 37, 1124-1128.

Freiberger JJ, Derrick BJ, Natoli MJ, Akushevich I, Schinazi EA, Parker C, Stolp BW, Bennett PB, Vann RD, Dunworth SA & Moon RE. (2016). Assessment of the interaction of hyperbaric N2, CO2, and O2 on psychomotor performance in divers. *J Appl Physiol (1985)* **121,** 953-964.

Balestra C, Lafere P & Germonpre P. (2012). Persistence of critical flicker fusion frequency impairment after a 33 mfw SCUBA dive: evidence of prolonged nitrogen narcosis? *Eur J Appl Physiol* 112, 4063-4068.

Rostain, J. C., Lavoute, C., Risso, J. J., Vallee, N., and Weiss, M. (2011). A review of recent neurochemical data on inert gas narcosis. *Undersea Hyperb. Med.*38, 49–59.

Dodatkowe źródła:

The Science of Diving: Things your instructor never told you (DAN Member's link – NON Member's link)

O autorze

Michael jest nagradzanym dziennikarzem i technologiem, który od dziesięcioleci pisze artykuły na temat nurkowania i technologii nurkowych. To on stworzył nazwę „nurkowanie techniczne”. Jego artykuły były publikowane w takich magazynach jak Alert Diver, DIVER, Quest, Scientific American, Scuba Times, Sports Diver, Undercurrent, Undersea Journal, WIRED i X-Ray. Michael stworzył i był redaktorem naczelnym aquaCORPS – magazynu, który pomógł wprowadzić nurkowanie techniczne do nurtu nurkowania rekreacyjnego. Zorganizował również pierwsze konferencje Tek, EuroTek i AsiaTek.