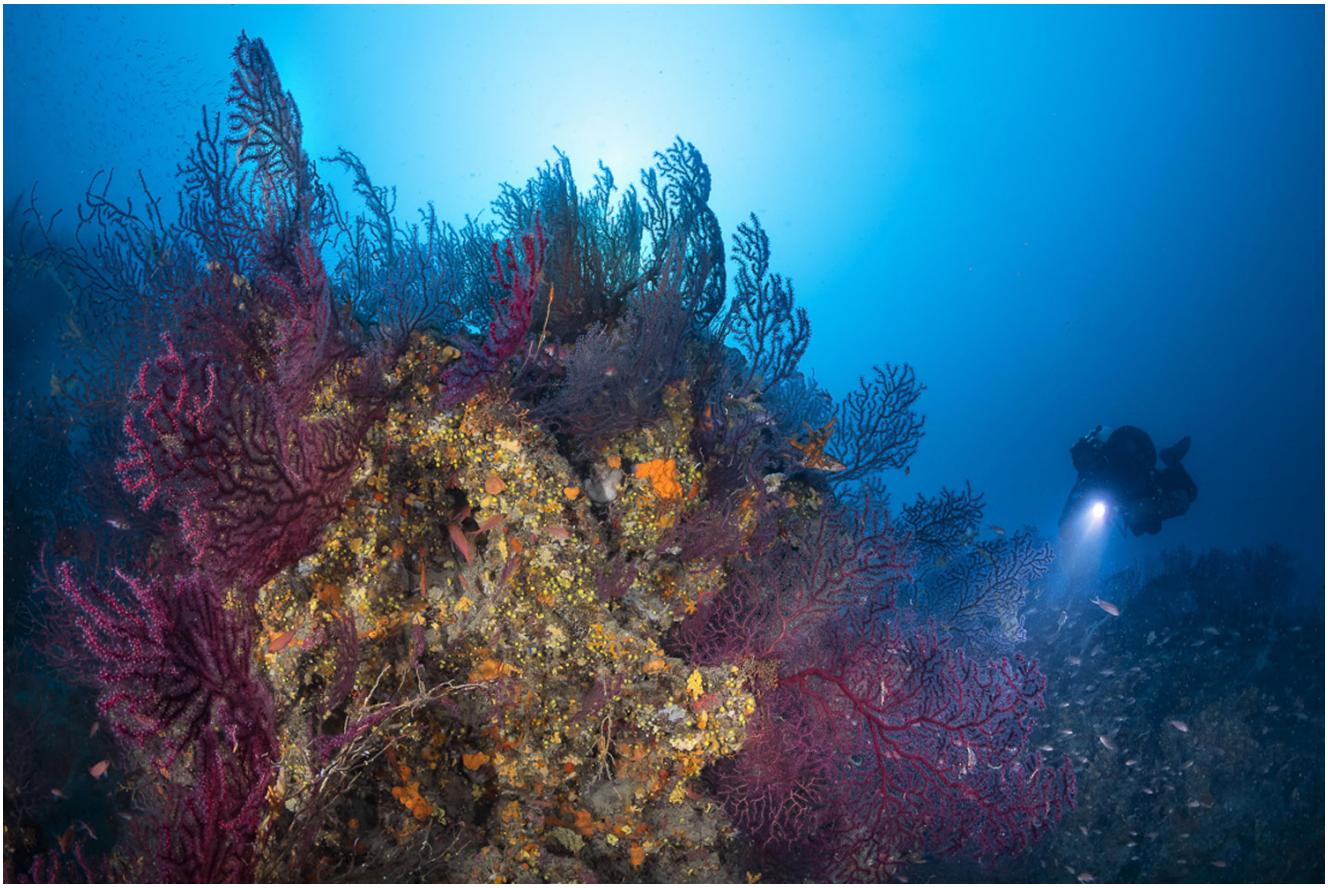
Měření narkózy způsobené inertním plynem

Naše poznání mechanismů a účinků dusíkové narkózy (neboli narkózy způsobené inertním plynem – IGN), kterou Jacques Cousteau poeticky nazval “blouzněním z hloubky”, se sice stále vyvíjí a prohlubuje, přesto se tento jev již poměrně dlouho považuje za velké nebezpečí ohrožující bezpečnost potápěčů. Pravdou je, že sportovní potápěči mnohem pravděpodobněji zažijí IGN než dekompresní onemocnění (DCI). I když se prokázalo, že potápěči si na narkózu vypracovat toleranci nemohou, přesto je možné naučit se, jak se dá vypořádat s různými stupni tohoto nebezpečného stavu.

V raných dobách přístrojového potápění byla dusíková narkóza hlavním omezujícím faktorem při ponorech pod 30-40 metrů, přičemž potápěči museli řešit svůj stav na vlastní nebezpečí, když se odvážili sestoupit hlouběji. Dnes, díky možnostem používat plynné směsi, lze snížit riziko plynoucí z IGN poměrně snadno.



Přesto však stále přetrvává diskuse, jaký rozsah narkózy je ještě „přijatelný“, do jaké míry se dá narkóza zvládnout a zdali i kyslík přispívá k narkotické účinnosti potápěčova dýchacího plynu. V současnosti platí, že **praxe existující v komunitě sportovních potápěčů se velice různí**.

Hlavním problémem při studiu IGN je neexistence objektivního a spolehlivého zjišťování nástupu a závažnosti (rozsahu) zmíněné narkózy. Potápěči se ukázali jako nespolehlivé zdroje informací, co se týče jejich vlastního hodnocení subjektivních příznaků a tradiční psychologické testování se provádí pod vodou jen velmi obtížně.

V minulém desetiletí však výzkumní pracovníci z DAN Europe zveřejnili několik studií obsahujících hodnocení účinnosti nového nástroje pro posouzení potápěčových kognitivních schopností. Tato metoda se nazývá *kritická frekvence blikání-fúze* (CFFF) a zdá se být objektivním měřítkem IGN, které lze snadno používat.

Tento článek se zaměří na dvě studie nabízející nové a doslova překvapivé porozumění a pochopení IGN. V první studii, jejíž výsledky byly zveřejněny v roce 2016, se pod názvem "Do Environmental Conditions Contribute to Narcosis Onset and Symptom Severity?" zjišťovaly účinky různých hyperbarických prostředí na IGN. Došlo se k závěru, že tlak a plyn mohou být jedinými externími faktory ovlivňujícími narkózu. Také se zjistilo, že nástup IGN začíná po krátké fázi zvýšené mentální ostrosti bezprostředně po sestupu a „dozvuky" narkózy přetrvávají alespoň 30 minut po ponoru.

V druhé studii nazvané "Early detection of diving-related cognitive impairment of different nitrogen-oxygen gas mixtures using critical flicker fusion frequency," kdy se srovnávala dusíková narkóza při ponorech se vzduchem a s nitroxem (EANx) pomocí jak CFFF, tak i použitím tradičních psychologických testů, se došlo k závěrům, že zvýšené parciální tlaky kyslíku v EAN mohou být významným modulátorem účinků IGN.

Stručně k blikání-fúzi

Kritická frekvence blikání-fúze (CFFF) je frekvence, při které se blikající světlo vnímá jako stálé a nepřetržité. Tato metoda se vyvinula počátkem dvacátého století a začala se používat při výzkumu fyziologie vidění. CFFF se stala důležitým nástrojem pro měření mentální bdělosti a ostrosti za podmínek zahrnujících patalogii, anestezi a pracovní zátěž při létání.



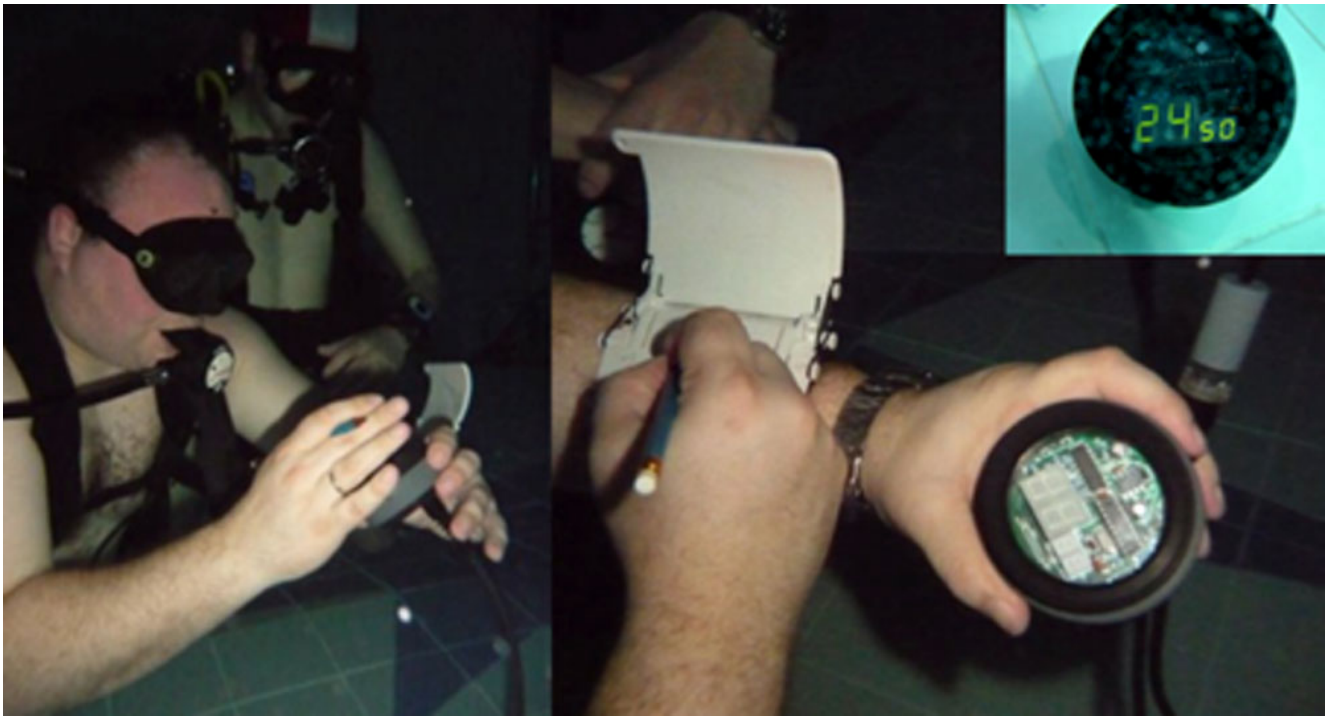
Když se kognitivní funkce lidí zhoršují nebo snižují, frekvence, při které se vnímá blikání, ustává, tj. „fúzní frekvence" klesá. Naopak, při stavech zvýšené mentální bdělosti fúzní frekvence stoupá. A jelikož různí jedinci vnímají odlišné frekvence, jako základní fúzní frekvence člověka se považuje 100% a CFFF se měří jako procento tohoto základu.

V roce 1960 poprvé upozornil zakladatel DAN USA, dr. Peter Bennett, na korelaci mezi mentálními stavy potápěčů, CFFF a elektroencefalogramem (EEG) a při následných výzkumech se zjistilo, že změny CFFF

během ponoru s helioxovou saturací se přibližně shodují se změnami EEG. Další výzkumy však tyto výsledky nezopakovaly a od používání CFFF se upustilo.

V posledních letech však výzkumní pracovníci DAN tuto zdánlivě obskurní metodu vzkřísili a zaznamenali s ní slibné výsledky. V roce 2012 totiž prokázali, že testy CFFF umožňují spolehlivé měření pod vodou a poskytují výsledky zjišťování kognitivních funkcí potápěče podobné, jakých se dosahuje u testů při použití psychologického experimentálního jazyka (PEBL), když se dýchá vzduch a kyslík za atmosférického tlaku (2014).

Testy CFFF se provádějí pod vodou mnohem snadněji než testy s PEBL a také je testovaný subjekt nemůže nijak snadno ovlivnit. Uskutečňují se pomocí malého válce opatřeného modrou kontrolkou LED a rotujícím kroužkem, který mění frekvenci blikání. Během testu se dívá potápěč přímo na kontrolku LED. Testující badatel pak frekvenci blikání zvyšuje nebo snižuje. Když se potápěči začne jevit blikání kontrolky LED jako stálý stav (fúze), test se zastaví a fúzní frekvence se zaznamená. Výsledky se poté porovnají s CFFF příslušného jedince před ponorem, což slouží jako základ. V daném případě se zvýšení fúzní frekvence rovná zvýšené kognitivní funkci a snížení se považuje za důkaz existující narkózy IGN.



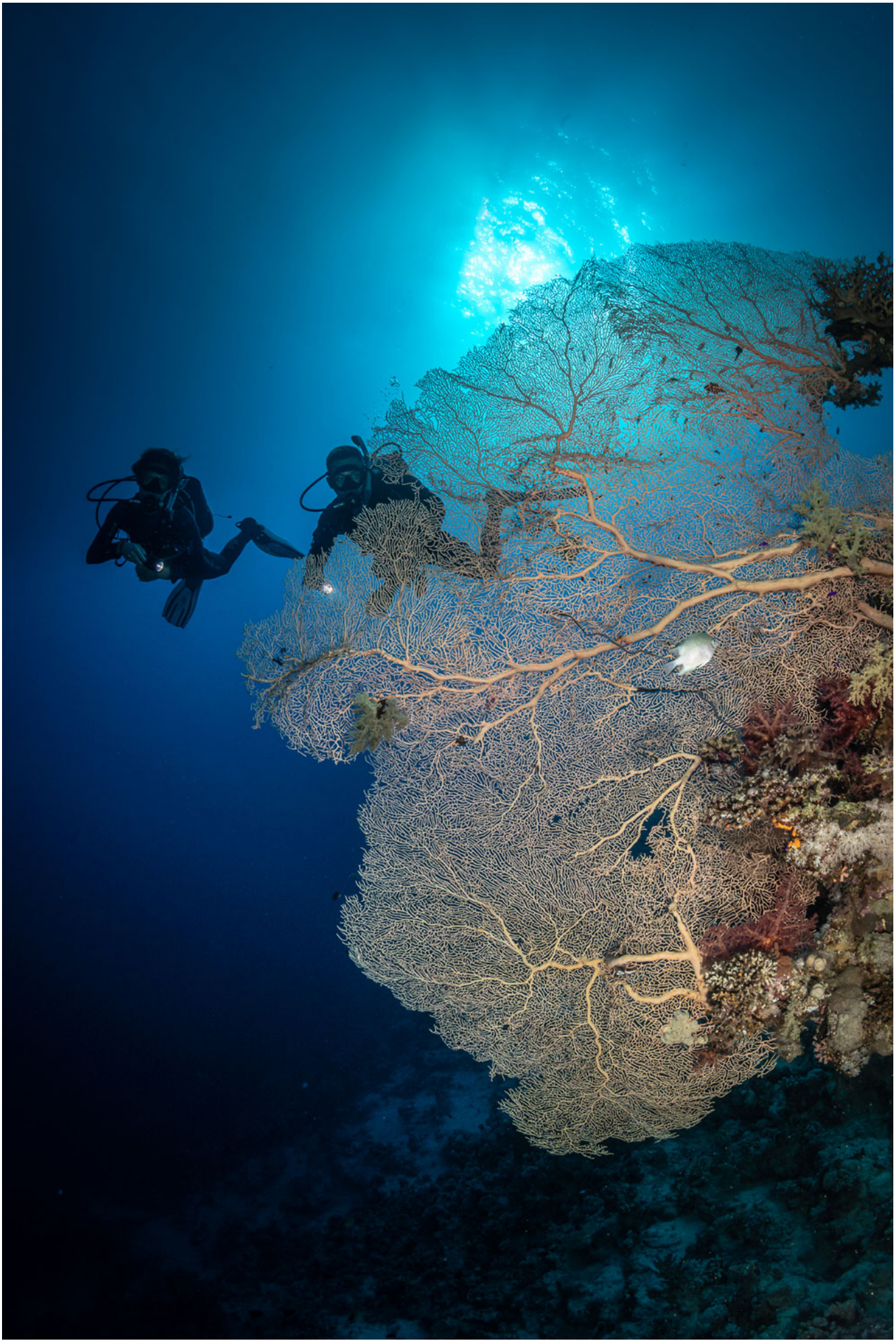
Jak dalece záleží na prostředí?

Jelikož se ví, že potápěči se pod vodou adaptují, všeobecně se uznává, že i samotné prostředí ovlivňuje výkonnost, a to kombinací různých faktorů. Z tohoto důvodu se sleduje celá řada faktorů, které zřejmě přispívají k nástupu narkózy IGN i k její intenzitě.

Za jeden z hlavních faktorů ovlivňujících IGN se považují zvýšené parciální tlaky oxidu uhličitého (PCO_2) vzniklé vyčerpáním při práci, usilovným plaváním, ale také námahou při samotném dýchání. Zvýšené parciální tlaky PCO_2 totiž vedou k rozšíření mozkových cév, což má za následek vyšší hladiny dusíku v mozku. Dalším pravděpodobným faktorem je chlad, neboť ten způsobuje zúžení periferních cév, ale protože mozkové cévy se zúžit nemohou, výsledkem je zvýšené zatížení mozku dusíkem.

Dalšími faktory, které zřejmě přispívají k narkóze IGN, je užití alkoholu nebo drog, kocovina nebo únava, úzkost, přetíženost, stres, omezená viditelnost, rychlost sestupu, závratě a prostorová dezorientace. Z

vědeckého pohledu však pro tyto faktory neexistuje dostatek důkazů, proto je nutné získat v tomto směru více přesných údajů. Z tohoto důvodu se tato první studie zaměřila na potápěčské prostředí.



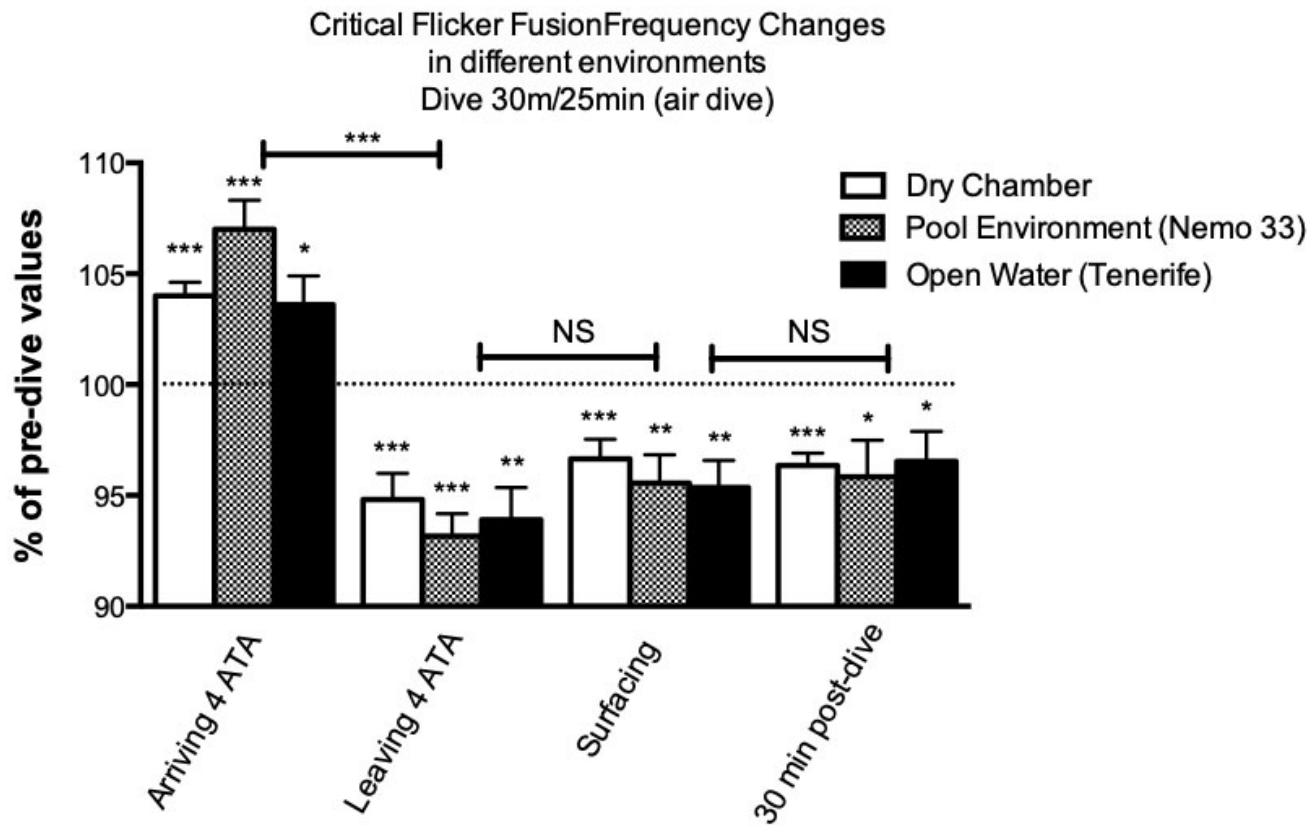
Výzkumníci získali vyrovnanou skupinu složenou ze 40 potápěčů nekuřáků ve věku 30-40 let, kteří pravidelně cvičí a jejichž index tělesné hmotnosti (BMI) dosahoval hodnoty 20-25. Tito potápěči se 72 hodin před uskutečněním výzkumu zdrželi požití jakéhokoli alkoholu.

Ponory provedené v rámci testu byly do hloubky 30 metrů po dobu 20 minut v nejnižším bodě, ale v třech odlišných prostředích: v hyperbarické komoře, v hlubokém bazénu Nemo 33 a na oceánu. Teplota vody v bazénu byla 33°C, neexistovala žádná tepelná ochrana. Teplota oceánu byla 19°C a potápěči měli na sobě řádné neoprénové kombinézy.

U každého ponoru se provedlo pět níže uvedených měření typu CFFF:

- Před ponorem, aby se stanovil u každého potápěče základ
- Při dosažení 30timetrové hloubky
- Pět minut před výstupem k hladině
- Po výstupu na hladinu
- Třicet minut po ponoru

Podle autorů se jednalo o vůbec první měření účinků IGN u standardní populace za odlišných podmínek prostředí (tj. za sucha oproti mokru, s ochranným oděvem či bez takové ochrany, bez zohledňování rozdílu mezi mořskou vodou a vodou v bazénu). Zjištěné výsledky byly překvapivé.



Jak ukazuje obrázek 1, výsledky CFFF byly pozoruhodně shodné u všech tří prostředí. Za prvé, hodnoty CFFF u potápěčů se při dosažené hloubce zvýšily, což naznačovalo zvýšenou kognitivní funkci. O 15 minut později došlo k významnému poklesu hodnot CFFF, tedy ke kognitivní degradaci, neboť zřejmě začínala působit narkóza. Kupodivu toto zhoršení přetrvávalo i na hladině a ještě 30 minut po ponoru.

Toto přetrvávání narkózy naznačuje, že stará rada jednoduše vystoupat o několik metrů výše při nástupu

narkotického stavu je zřejmě naprosto neúčinná strategie. Rovněž překvapivé bylo zjištění zvýšených hodnost CFFF při dosažení největší hloubky, což naznačovalo zvýšené mentální vzrušení.

Podle vědců se tyto poznatky shodují s proteinovou teorií narkózy, jejíž mechanismus začal poslední dobou vytlačovat starší Meyer-Overtonovu teorii anestézie založenou na rozpustnosti lipidů, i když podobné účinky mají zřejmě oba mechanismy.

Autoři studie vyslovili hypotézu, že pozorované účinky mozkového vzrušení s následnou degradací jsou výsledkem rovnováhy mezi „drogovými" účinky dusíku a kyslíku na receptory GABA a farmakokinetikou těchto interakcí. Kyslík neurotransmitery aktivuje, zatímco dusík na ně působí tlumivě (viz Rostain et al. 2011; Balestra et al. 2018).

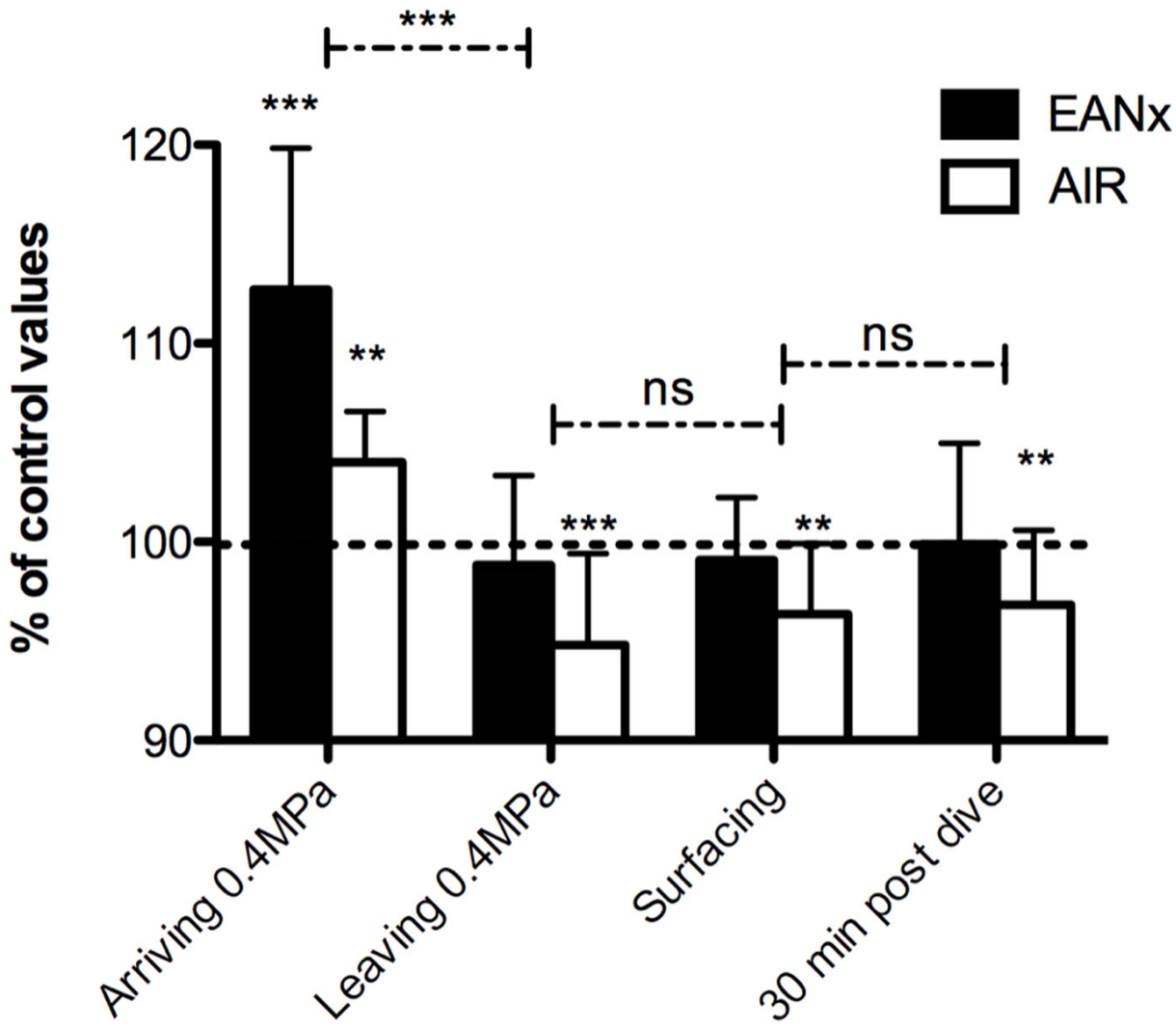
Autoři došli k závěru, že při objektivním měření mohou být tlak a plyn jedinými externími faktory ovlivňujícími narkózu IGN. Jelikož tato studia nebyla zaměřená na stavy při zatížení (tj. při zvýšených PCO_2), mohlo by se jednat (a pravděpodobně se jedná) o kritický faktor.

Vzduch versus nitrox

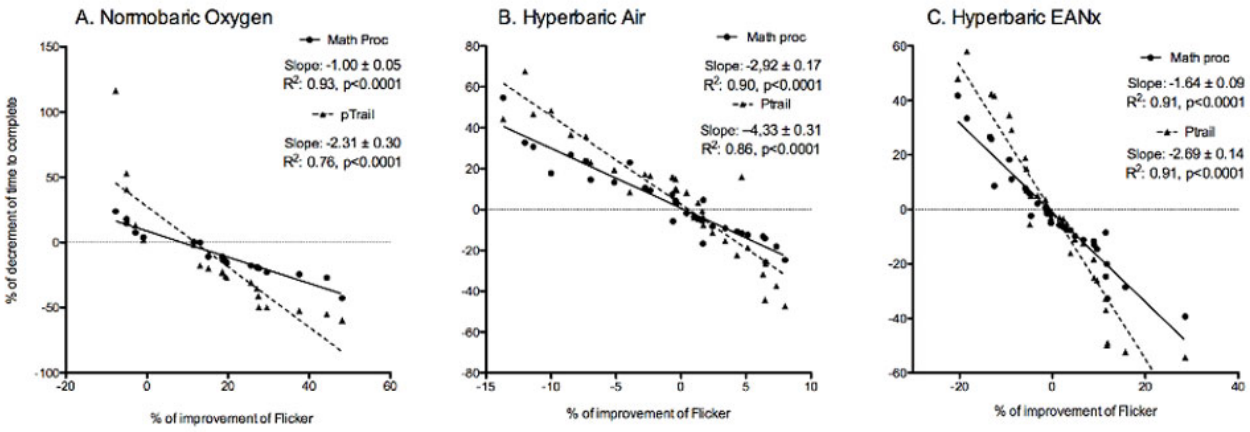
Existuje několik srovnatelných studií na vliv dýchacího vzduchu a obohaceného dýchacího plynu typu nitrox (EANx) na narkózu IGN. Některé studie popisují zhoršenou psychomotorickou výkonnost při dýchání O_2 nebo EANx. V jiných studiích se uvádí, že narkotické zhoršení je stejné, i když to potápěči mohou vnímat jinak. Cílem těchto studií bylo zlepšit kognitivní výkonnost změnou parciálních tlaků kyslíku a zvýšit efektivitu CFFF jako měřicího nástroje.

Pro tuto studii vědci vybrali osm potápěčů, opět ve věku 30-40 let s BMI 20-25. Testovací ponory se uskutečnily se vzduchem nebo s EANx 40 v náhodném pořadí v suché komoře, kde se vdechované plyny dopravovaly skrze obličejovou masku. Profil ponoru byl stanoven tak, aby vyvolal narkózu: do 30 metrů nebo 4 ATA s pobytem v nejnižším bodu po dobu 22 minut a s 12 minutami lineární dekomprese v 3 metrech za minutu s tříminutovou bezpečnostní zastávkou v hloubce 3 metrů.

Kognitivní výkonnost potápěčů se vyhodnocovala během ponorů jak testovacím přístrojem na CFFF, tak pomocí souboru počítačových testů s použitím PEBL, kdy se prováděly testy matematické, stopovací a testy na vnímání bdělosti. A stejně jako v předchozí studii se potápěči hodnotili před ponorem, při dosažení tlaku 4 ATA, při výstupu z tlaku 4 ATA, na hladině a 30 minut po ponoru.



Jak ukazuje obrázek 2, průběh hodnot CFFF při použití vzduchu a EANx vykazoval podobný vzorec jako u první studie. Při dýchání vzduchu se hodnoty CFFF zvýšily při dosažení tlaku 4 ATA a po 15 minutách následoval pokles. Zhoršení přetrvávalo i na hladině a po dobu 30 minut po ponoru. Při dýchání EANx se hodnoty CFFF zvýšily při dosažení stanovené hloubky a po 15 minutách se snížily. Po snížení však následoval návrat k základní hodnotě. Od základu se statisticky lišilo jen první měření.



Obrázek 3 ukazuje významnou inverzní korelaci mezi změnami hodnot CFFF a časem potřebným k dokončení testů PEBL u obou směsí plynů. Podobně jako u hodnot CFFF čas potřebný k provedení testů naznačoval zlepšení při dosažení hloubky u obou plynů a poté nastalo zhoršení (jednalo se o delší časy), když ponor pokračoval a trvalo to až 30 minut po ponoru. Tím se potvrdila validita CFFF jako měřicího nástroje za hyperbarických podmínek a bylo zřejmé, že výsledky CFFF jsou srovnatelné s těmi při použití PEBL.

Stlačený vzduch patří do pneumatik?

I když se při ponorech projevoval podobný průběh, mezi oběma plyny existoval jeden významný rozdíl. EANx byl typický pro větší mozkovou aktivitu, než tomu bylo u ponorů se vzduchem a také tam docházelo k mírnějšímu zhoršení v pozdější fázi ponoru a po ponoru. Tato skutečnost se shodovala s výsledky první studie zaměřené na různé podmínky odlišných prostředí.

Autoři této studie vyslovili hypotézu, že větší podíl vdechovaného kyslíku má prospěšný účinek na bdělost a kognitivní výkonnost. To se prokázalo také při jiných výzkumech zaměřených na dýchání kyslíku. Rovněž to naznačuje možnost, že potápěči náchylní na narkózu IGN mohou být rovněž citliví na účinky zvýšeného PO_2. Navíc i malé snížení PN2 mělo za následek prospěšný účinek EANx 28 (28% kyslíku) na kognitivní výkonnost v předchozí studii.

Co z toho vyplývá? Tato studie podpořila tvrzení prosazované mezinárodní potápěčskou organizací Global Underwater Explorers (GUE), že “stlačený vzduch patří do pneumatik.” Potápěči zřejmě zažijí méně narkózy, když se budou potápět s nitroxem než se vzduchem, navíc nitrox nabízí i další výhody v souvislosti s dekompresí.

Klíčové odkazy

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.

Další zdroje:

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

O autorovi

Michael je novinář vyznamenaný řadou cen, a zároveň odborník zabývající se již několik desetiletí potápěním a nejrůznějšími technickými aspekty souvisejícími s potápěním. Je přímým autorem pojmu „technické potápění“. Jeho články a studie byly zveřejněny v časopisech jako Alert Diver, DIVER, Quest, Scientific American, Scuba Times, Sports Diver, Undercurrent, Undersea Journal, WIRED a X-Ray. Založil a pracoval ve funkci šéfredaktora aquaCORPS, což pomohlo zařadit technické potápění do hlavního spektra sportovního potápění. Rovněž pořádal první konference Tek, EuroTek a AsiaTek.