

Oceán ztrácí dech

Kirsten Isensee,
Lisa A. Levin,
Denise Breitbart,
Marilaure Gregoire,
Véronique Garçon a
Luis Valdés

V posledních desetiletích se celosvětově zhoršil pokles obsahu kyslíku (odkysličování) v pobřežních a oceánských vodách. Hlavními příčinami jsou klimatické změny (teplejší voda zadržuje méně kyslíku a způsobuje zvýšenou stratifikaci, což snižuje ventilaci, tj. doplňování kyslíku v oceánském nitru a ústích řek) a měřitelně vyšší koncentrace živin (eutrofizace) v důsledku intenzivnější lidské činnosti ovlivňující pobřežní oblasti. Odkyselení otevřeného oceánu, oteplování a okyselení oceánů jsou způsobeny zvýšeným obsahem atmosférického oxidu uhličitého (CO₂); představují mnohočetné stresory pro mořské ekosystémy, jejichž socioekonomické důsledky se teprve začínají doceňovat.

Problém snižujícího se obsahu kyslíku (odkysličování) v pobřežních a oceánských vodách se v posledních desetiletích celosvětově zhoršil, především v důsledku změny klimatu a přísunu živin z lidských zdrojů, jako je zemědělství a odpadní vody. Předpokládá se, že odkysličování mořských vod se bude dále zhoršovat s pokračujícím nárůstem globálních teplot a počtu lidské populace, což bude mít rozsáhlé důsledky. Kyslík je základní podmínkou pro veškerý aerobní život od přílivu až po největší hloubky oceánu. Kyslík má zásadní význam pro zdraví planety, protože hraje přímou roli v biogeochemickém koloběhu uhlíku, dusíku a mnoha dalších klíčových prvků. Rozsah odkysličování sahá od malých pobřežních oblastí a ústí řek až po rozsáhlé oblasti ve vnitrozemí otevřeného oceánu, označované jako kyslíkové minimum a limitní zóny. Dopady lokálního odkyselení se mohou projevit ve větším měřítku prostřednictvím migrace organismů a ekologických, ekonomických a společenských důsledků ztráty produkce rybolovu a akvakultury v postižených biotopech. Deoxygenace oceánů byla diskutována v poslední zprávě IPCC (2014), ale globální povaha této nově vznikající hrozby pro oceán nebyla plně uznána ani zahrnuta do plánování ze strany tvůrců politik a zúčastněných stran na globální úrovni. Odkyselení související se zemědělstvím a lidským odpadem bylo obecně řízeno na úrovni

a nízký obsah kyslíku v hlubších a vzestupných vodách, který byl v minulosti považován za převážně přírodní jev, je teprve nyní považován za důsledek klimatických změn způsobených CO₂.

VĚDECKÉ ZÁZEMÍ

Oceán je hlavním aktérem při zprostředkování globálního koloběhu kyslíku. Fotosyntéza mořských řas produkuje kyslík, který zajišťuje nejméně 50 % kyslíku, který dýcháme; zároveň dochází k neustálému úbytku kyslíku ve vodním sloupci a sedimentech oceánu v důsledku dýchání a vyrovnávání povrchových vod s atmosférou. Tento úbytek kyslíku je zhoršován antropogenním obohacováním pobřežních a otevřených oceánských vod živinami a změnami zemského klimatu způsobenými zvyšujícím se obsahem oxidu uhličitého v atmosféře.

Hypoxické až anoxické a dokonce sulfidické podmínky byly zaznamenány v různých vodních systémech, od jezer, ústí řek a pobřežních oblastí až po pobřežní oblasti oceánu, kde doplňování kyslíku nekompensuje jeho spotřebu (IPCC, 2014). Prahová hodnota hypoxie, která se často používá pro ústí řek a mělké pobřežní vody, je 60 μmol kg⁻¹ (přibližně 1,5 ml l⁻¹ nebo 2 mg l⁻¹) (Gray *et al.*, 2002) a oblasti s koncentrací kyslíku pod touto



úrovni jsou

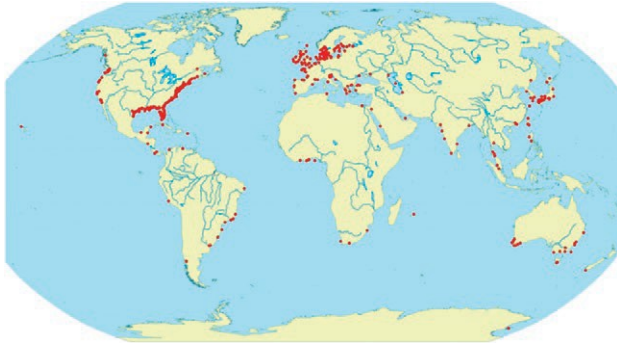


běžně označované jako "mrtvé zóny". Odolnost vůči hypoxii se však u jednotlivých mořských taxonů značně liší; některé druhy vyžadují pro neomezený nárůst a růst koncentrace kyslíku mnohem vyšší než 60 $\mu\text{mol kg}^{-1}$, zatímco jiné jsou přizpůsobeny životu v podmínkách s nízkým obsahem kyslíku. Obecně platí, že nejcitlivější jsou pohyblivé ryby a křížáci (Vaquer-Sunyer & Duarte, 2008). Větší živočichové se obvykle s poklesem koncentrace kyslíku pod 60 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ stávají stále vzácnějšími a nakonec se ze systému ztrácejí.

V pobřežních oceánech se počet hlášených mrtvých zón od 60. let 20. století exponenciálně zvýšil a více než 479 systémů nyní hlásí koncentrace kyslíku pod 60 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ během některé části roku (obr. 1, např. Baltské moře, Černé moře, Kattegatské moře, Mexický záliv, Východočínské moře) (Diaz & Rosenberg, 2008). Část tohoto nárůstu lze přičíst zdokonaleným strategiím pozorování a monitorování, jakož i zvýšenému povědomí o problému, ale velká část je důsledkem zrychleného a neefektivního používání chemických hnojiv a znečištění způsobeného nárůstem lidské populace. Hypoxii pobřežních oblastí a ústí řek zhoršuje také měnící se klima. V estuárních, šelfových a horních svahových oblastech, kde je bota osídlena ekologicky a hospodářsky cennými bentickými druhy, může výskyt hypoxických/anoxických podmínek způsobit katastrofální biologické ztráty. Některé z nejzávažnějších příkladů hypoxie v ústích řek se vyskytovaly v minulosti a stále se vyskytují v systémech, kde jsou surové odpadní vody z velkých populačních center vypouštěny přímo do vodních toků. To také představuje důležitý souběh obav o zdraví lidí a životního prostředí, který přesahuje obavy o potravinovou bezpečnost související s možnými účinky hypoxie na rybolov a akvakulturu.

V otevřeném oceánu se východní hraniční upwellingové systémy (EBUS) vyznačují vysokou produkcí primární a exportní, která v kombinaci se slabou ventilací způsobuje přirozené vyčerpání kyslíku a vznik středovodních kyslíkových minizón (obr. 2, OMZ). Ty jsou definovány jako oblasti, kde je hladina rozpuštěného kyslíku v subtermoklině 20 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ (< 0,5 ml l⁻¹), ačkoli u mnoha specií dochází k omezení při vyšších hodnotách kyslíku (Gilly *et al.*, 2013). Například velcí mlži pocitují

nedostatek kyslíku při hodnotách <150 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ (3,5 ml l⁻¹);



Obr.1 - Světové hypoxické a eutrofní pobřežní oblasti (Diaz, nepublikováno; aktualizováno Diaz2015 & Rosenberg 2008).

Prince & Goodyear, 2006). OMZ hrají klíčovou roli v atmosférické chemii a klimatu prostřednictvím emisí aktivních stopových plynů (Law *et al.* , 2013) a ovlivňují téměř všechny aspekty struktury a funkce ekosystémů ve vodě a na mořském dně (Levin, 2003; Levin *et al.* , 2009). OMZ jsou velmi dynamické v průběhu glaciálních a interglaciálních období (Moffitt *et al.* , 2015), ale zdá se, že se v tropických a subtropických oblastech a v SV Pacifiku v důsledku změny klimatu rozšiřují (Stramma *et al.* , 2010).

Oteplování oceánů přispívá k odkysličování několika způsoby: teplejší voda zadržuje méně kyslíku v důsledku regulace rozpustnosti kyslíku vlivem teploty. Oteplování oceánu zvyšuje hustotní stratifikaci v důsledku změn teploty a salinity (v důsledku tání ledu a srážek). Větší stratifikace snižuje ventilaci (doplňování kyslíku) jak v nitru oceánu (Keeling *et al.* , 2010, Stramma *et al.* , 2008a, 2008b, 2010), tak v ústích řek (Altieri a Gedan, 2014). Oteplování také zvyšuje metabolické nároky organismů a rychlost remineralizace, čímž se snižuje hladina kyslíku. V otevřeném oceánu, zejména v severním Pacifiku, zvyšuje primární produkci atmosférický přísun dusíku a železa; potopení a mikrobiální rozklad nakonec spotřebovávají další kyslík (Ito *et al.* , 2016). Podél kontinentálních okrajů na východní hranici vytváří atmosférické oteplování teplotní rozdíly mezi pevninou a mořem, které mohou zesílit upwelling, což vede k většímu přísunu živin (a s tím související produkci a biogeochemickému čerpání) a také k advekci vod s nízkým obsahem kyslíku směrem nahoru (Bakun, 20151990,;

Sydeman *et al.* , 2014, Wang *et al.* , 2015). Dalším zdrojem spotřeby kyslíku v hlubokých okrajových vodách může být disociace vyvolaná oteplováním, která může být způsobena např.



pohřbeného zmrzlého metanu v hydrátech plynu (Phrampus a Hornbach, 2012). Aerobní oxidace metanu ve vodním sloupci dále vyčerpává hladinu kyslíku ve středních vodách (Boetius a Wenzhoffer, 2013). Existuje několik oblastí, kde mohou cirkulační vzorce změněné klimatem zesílit hypoxii tím, že posílí spodní proudy s nízkým obsahem kyslíku nebo oslabí proudy přenášející kyslík, (Gilbert *et al.* , 2005, Bograd *et al.* , 2015, Nam *et al.* , 2015), Naopak předpovědi většího výskytu a intenzity cyklónů a hurikánů vyvolají promíchávání, které může lokálně hypoxii zmírnit (Rabalais *et al.* , 2009). Oteplení může také prodloužit období sezónní hypoxie nebo vést k dřívějšímu nástupu a potenciálně většímu výskytu škodlivého rozkvětu řas (HABS), které při svém rozkladu rovněž spotřebovávají kyslík (Wells *et al.* , 2015).

Některé změny klimatu mohou zhoršit přísun živin a přispět k hypoxii. Stoupající hladina moře může nepřímo zlikvidovat mokřady, které odstraňují živiny z vod proudících do pobřežního oceánu. Kromě oteplování může zvýšená hladina CO₂ změnit funkci rostlinných pórů na pevnině, což zvyšuje efektivitu využití vody a zanechává o 3-6 % více odtoku vody, který akumuluje živiny před vstupem do oceánu (Reay *et al.* , 2009). Zvyšující se množství srážek může přispívat k hypoxii prostřednictvím intenzivnějšího odtoku živin, tání sněhu, eroze půdy a větší stratifikace (<http://nca2014.globalchange.gov>).

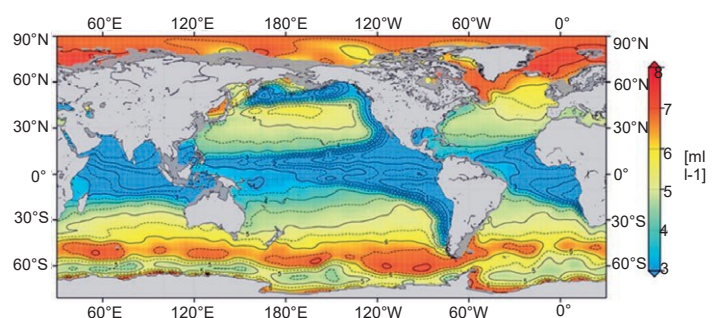
Výsledky nejnovějších výzkumů naznačují, že potenciální rozšíření pobřežní hypoxie a OMZ by mohlo mít velký vliv *např.* na rybářské druhy prostřednictvím stlačení biotopů, změny potravních řetězců a pozměněných interakcí mezi druhy, včetně interakcí s rybáři.

Předpokládá se, že v důsledku kombinovaných účinků oteplování a odkyselování na metabolický index ryb a bezobratlých dojde ke zmenšení biotopů a areálů druhů (Deutsch *et al.* , 2015). Dokonce i při neletálních úrovních může vystavení nízkým koncentracím rozpuštěného kyslíku vést ke snížení růstu a reprodukce, velikosti těla a také ke změnám v chování a rozšíření mořských druhů (Cheung *et al.* , 2013). To znamená, že odkyselování oceánů bude stále více zatěžovat vodní ekosystémy při pobřeží a v hlubších oceánských biotopech.

a ekologický stav a fungování mořských a sladkovodních ekosystémů, jakož i poskytování ekosystémových služeb. S tím, jak oceán ztrácí lokálně dech, je omezena globální ekosystémová služba spočívající v poskytování prostředí příznivého pro život.

V širším měřítku globální syntézy údajů o kyslíku ukazují, že hypoxické vody se rozšířily o 4,5 km² v m200 (Stramma *a kol.* , 2010) s rozsáhlým úbytkem v jižním oceánu (Helm *a kol.* , 2011), západním Pacifiku (Takatani *a kol.* , 2012) a severním Atlantiku (Stendaro a Gruber, 2012). Celkový úbytek kyslíku byl větší v pobřežních vodách než v otevřeném oceánu (Gilbert *et al.* , 2010) a často větší na pobřeží než na volném moři (Bograd *et al.* , 2015).

Modelové simulace mají stále potíže s řádným reprezentováním historických údajů o kyslíku z posledních let40 (Cabré *et al.* , 2015). Je zřejmé, že nám chybí úplná představa o mechanismech, které ovládají kyslík ve vnitrozemí oceánu a na šelfech. Nicméně prognózy klimatických modelů předpovídají pokračující a intenzivnější odkysličování oceánů i do budoucna (*např.* Matear *et al.* , 2000; Bopp *et al.* , 2002, 2013; Oschlies *et al.* , 2008). Nedávné snahy modelovaly deoxygenaci na pozadí přirozené variability s cílem předpovědět dobu vzniku signálu deoxygenace v globálních oceánech (obr. 3; Long *et al.* , 2016). Závěr těchto modelů je podpořen geologickým záznamem, který ilustruje expanzivní oceánské anoxické události, které následují po klimatických exkurzích a meziledových dobách (Moffitt *et al.* , 2015).



Rozšiřování hypoxických a anoxických zón ovlivní biogeochemi-



Obr. 2 - Průměrná roční koncentrace kyslíku [ml l⁻¹] v 200hloubce m (mřížka o jednom stupni, obrysový interval ml 0.5l) (World Ocean Atlas Garcia2013, *et al.*, 2014).



STRATEGIE PRO BUDOUCNOST

Odkyselování spolu s oteplováním a okyselováním oceánů tvoří smrtící trojici hrozeb pro život v oceánech od mělkých vod až po hluboké oceány (Gattusso *a kol.*, 2015; Levin a LeBris, 2015). Tyto tlaky mají pro mořské ekosystémy kritický význam, protože se v krátkém časovém horizontu drasticky zrychlují (Gruber, 2011; Mora *a kol.*, 2013; Bopp *a kol.*, 2013). K lepšímu pochopení toho, jak kyslík ve vzájemné interakci s dalšími stresory utváří strukturu ekosystému a ovlivňuje jeho funkci, je zapotřebí více přístupů, včetně využití přírodních gradientů, 88 historických dat, geochemických proxy a laboratorních experimentů (Breitburg *et al.*, 2015; Sperling *et al.*, 2016). Budoucí scénáře vývoje kyslíku v pobřežních oblastech a na otevřeném oceánu budou do značné míry záviset na kombinaci faktorů souvisejících s globálními změnami životního prostředí a využíváním půdy, včetně oteplování, rostoucího počtu lidí, zejména na pobřeží, a zemědělských postupů. Při zachování obvyklého scénáře se předpokládá, že množství reaktivního dusíku vstupujícího do pobřežních oblastí a otevřeného oceánu vzroste do roku 2050 o 50 % (Noone *et al.*, 2012), což povede ke zvýšení četnosti, intenzity a trvání hypoxie (Ito *et al.*, 2016). Současně se předpokládá, že zesilující vzestupné větry (Wang *et al.*, 2015) přivedou vody OMZ blíže k pobřeží a na šelf, kde mohou interagovat s vodními a pobřežními zdroji hypoxie (Feely *et al.*, 2008, 2010). K prevenci a nápravě hypoxie jsou naléhavě zapotřebí integrovaná opatření (Levin & Breitburg, 2015).

Většina informací o hypoxii vychází z vědecké činnosti výzkumníků v Severní Americe, Evropě a Asii, ale nedávná zjištění také naznačují, že peruánsko-chilské okraje, západní Afrika a severní část Indického oceánu a Bengálského zálivu jsou stále více ohroženy deoxygenací šelfu (Hofmann *a kol.*, 2011). Příklady ilustrující závažnou hypoxii v důsledku této hrozby způsobené člověkem lze nalézt v minulosti, *např.* ústí řeky Temže ve Velké Británii a řeky Delaware v USA. Závažný problém představuje i v rozvojových a rychle se industrializujících zemích, *např.* ústí Perlové řeky v Číně. O oceánografických podmínkách v nejméně obydlených částech světa víme jen velmi málo.

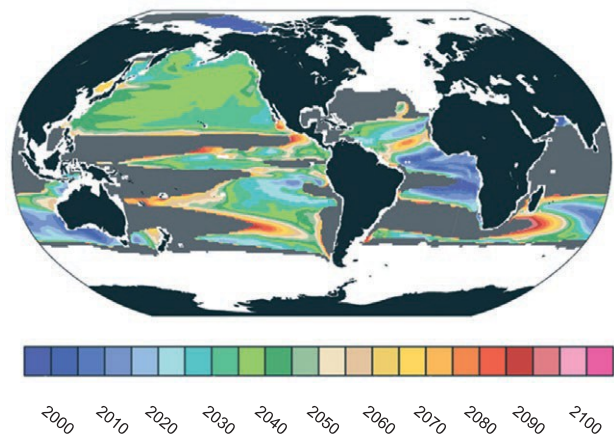


planety - v otevřeném oceánu a na oceánských ostrovech.

- je však zřejmé, že některé z těchto systémů jsou také ovlivněny. Celosvětová síť by usnadnila a zlepšila možnosti monitorování kyslíku v oceánech a pomohla by identifikovat mezery ve znalostech, aby bylo možné zaměřit další výzkum. Je zapotřebí nového společného výzkumu, který by rozšířil globální pokrytí údajů o kyslíku, revidoval modelové výpočty a standardizoval používané metody, zlepšil předpovědi týkající se potravinové bezpečnosti a cestovního ruchu a vyhodnotil dopady na netržní ekosystémové služby, jako je sekvestrace uhlíku, koloběh živin, biologická rozmanitost a podpora potravní sítě. Celosvětový rozsah a ohrožení zdraví člověka a služeb mořských ekosystémů způsobené odkyselováním oceánů se teprve začíná doceňovat; sociální a ekonomické důsledky je třeba teprve určit, ale pravděpodobně budou značné. Jednou z největších výzev pro budoucí vědeckou činnost je tedy ocenit dopad odkyselování oceánů. Potřebných peněžních hodnocení zohledňujících tržní i netržní důsledky snížené koncentrace kyslíku je dosud velmi málo, jsou příliš obecná (Mora *et al.* , 2013) nebo se omezují na určité oblasti světa, *např. na* Mexický záliv (Rabotyagov *et al.* , 2014).

Dobrou zprávou je, že pokud je příčinou hypoxie eutrofizace, je možné obnovit hladinu kyslíku i v těch nejmrtvějších zónách. Mořské sedimenty však způsobují zpoždění v obnově. Kvůli

Úbytek kyslíku v oceánech
Časový rámec, ve kterém se očekává, že
odkyselení oceánů v důsledku změny klimatu
bude zjistitelné.



Obr. 3 - Čas vzniku signálu oceánské deoxyge-
race na pozadí variability (z Long *et al.* , 2016).



nelinearitu mořských procesů je obtížné posoudit a může se v jednotlivých systémech lišit. Válčení bude navíc bránit obnově hypoxických oblastí a může vyžadovat větší omezení vypouštění živin do vodních toků (Capet *et al.*, 2013). Je zapotřebí jak zpracování lidského odpadu, tak dramatické zvýšení účinnosti využívání hnojiv. Institucionální kapacity pro nakládání s odpady a živinami je třeba posílit a zavést na místní, národní, regionální a celosvětové úrovni. Je také zapotřebí nových partnerství veřejného a soukromého sektoru napříč klíčovými odvětvími, aby se stimulovaly inovace v oblasti technologií snižování a opětovného využívání živin. Soubor nástrojů pro zmírnění a adaptaci na odkyselení musí být různorodý a může zahrnovat soubor postupů, které vytvářejí bezpečný prostor pro ekosystémy (Scheffer *et al.*, 2015). Mezi ně patří řízení kvality vody

ment, omezení odlovu nebo uzavření rybolovu v období s nízkým obsahem kyslíku, vytvoření okysličených refugíí nebo chráněných mořských oblastí, obnovení cirkulace nebo proplachování v uzavřených vodních útvarech a kontrola stresu způsobeného nemocemi, kontaminanty, degradací stanovišť nebo invazivními druhy. Odkyselování otevřeného oceánu, oteplování a okyselování oceánů jsou způsobeny zvýšeným obsahem CO₂ v atmosféře. Proto je nejúčinnějším řešením pro zmírnění globální změny životního prostředí omezení emisí uhlíku. Je velmi důležité rozpoznat a pochopit tyto klimatické stresory jako kumulativní dopady, které se vzájemně ovlivňují s dalšími lidskými činnostmi, a podle toho řídit oceánské ekosystémy.

Problém oceánu s více stresory: zvýšená teplota, vyšší kyselost, snížený obsah kyslíku.

Všechny oblasti oceánu jsou ovlivňovány mnoha stresovými faktory. Předpokládá se, že biologická odezva na ně vykazuje velkou variabilitu a komplexnost. Snížení lokálních stresorů může potenciálně ovlivnit dopad globálních faktorů. Omezení rybolovu může někdy kompenzovat úmrtnost a ztrátu produkce v důsledku hypoxie (Breitburg *et al.*, 2009), ale má důsledky pro zásobování lidí potravinami a ekonomiku. Abychom mohli udržitelně hospodařit s oceánem, je třeba při výpočtech a předpovědích budoucího stavu našeho mořského prostředí zohlednit dopady více stresových faktorů.

I když chemické a fyzikální změny spojené s oteplováním, okyselováním a odkyselováním oceánů probíhají po celém světě, otisk těchto globálních stresorů bude mít silný regionální a místní charakter. Souběh různých globálních stresových faktorů v určitých regionech již vytváří řadu "horkých míst", např. východní hraniční upwellingové oblasti. Kromě těchto regionálních "horkých míst" jsou některé mořské ekosystémy velmi zranitelné vůči různým stresorům, např. korálové útesy. Jiné příklady ukazují, že vrcholoví predátoři v mořské potravní síti východního tropického Pacifiku, kteří jsou rovněž důležití pro hospodářský rozvoj některých regionů, jsou oslabeni odkyselováním, okysličováním oceánů a zvyšováním teploty.

Různé úrovně odezvy vyžadují hodnocení zahrnující pozorování, experimenty a prognostické modely, které zohlední dopady více stresorů na fyziologické/biogeochemické úrovni, na úrovni organismu a ekosystému.

V návaznosti na vědecké poznatky musí politika jednat s cílem řídit mořské zdroje s ohledem na četné stresové faktory. Je třeba vyvinout nebo zavést systémy řízení mořských zdrojů napříč měřítky. Změna chování společnosti by měla vést ke snížení místních hrozeb a zároveň by měl být přijat preventivní přístup k vícenásobným stresorům v globálním měřítku. V neposlední řadě je třeba budovat kapacity, aby bylo možné přenést znalosti o sběru dat, správě dat a modelování do regionů postižených odkyselováním a okyselováním, kde jsou však znalosti a porozumění těmto procesům stále velmi omezené.



ODKAZY

- ALTIERI A.H. a GEDAN K.B., 2014 - *Změna klimatu a mrtvé zóny*. Global change biology, doi : 10.1111/gcb.12754.
- BAKUN A., 1990- *Globální změna klimatu a intenzifikace pobřežního oceánského proudění*. Science, : 247198-201.
- BAKUN A., BLACK B.A., BOGRAD S.J., GARCIA-REYES M., MILLER A.J., RYKACZEWSKI R.R. a SYDEMAN W.J., 2015- *Anticipated Effects of Climate Change on Coastal Upwelling Ecosystems*. Current Climate Change Reports 85-93.2,
- BOETIUS A. a WENZHÖFER F., 2013- *Spotřeba kyslíku na mořském dně poháněná metanem ze studených průsaků*. Nature Geoscience doi:10.1038/ngeo1926.
- BOGRAD S.J., CASTRO C.G., DI LORENZO E., PALACIOS D.M., BAILEY H., GILLY W. a CHAVEZ F.P., 2008- *Oxygen Declines and the Shoaling of the Hypoxic Boundary in the California Current*. Geophys. Res. Lett., 35, L12607.
- BOGRAD S.J., BUIL M.P., DI LORENZO E., CASTRO C.G., SCHROEDER I.D., GOERICKE R., ANDERSON C.R., BENITEZ-NELSON C. a WHITNEY F.A., 2015 - *Changes in Source Waters to the Southern California Bight*. Deep-Sea Res. Pt II, 112, 42-52.
- BOPP L., LE QUERE C., HEIMANN M., MANNING A.C. a MONFRAY P., 2002 - *Climate Induced Oceanic Oxygen Fluxes : Implications for the Contemporary Carbon Budget*. Global Biogeochem. Cycles 16, doi : 10.1029/2001GB001445.
- BOPP L., RESPLANDY L., ORR J.C., DONEY S.C., DUNNE J.P., GEHLEN M., HALLORA P., HEINZE C., ILYINA T, SÉFÉRIAN R., TJIPUTRA J. a VICHI M., 2013 - *Multiple Stressors of Ocean Ecosystems in The 21st Century : Projections with CMIP5 Models*. Biogeosciences, 10, 6225-6245.
- BREITBURG D.L., CRAIG J.K., FULFORD R.S., ROSE K.A., BOYNTON W.R., BRADY D.C., CIOTTI B.J., DIAZ R.J., FRIEDLAND K.D., HAGY J.D., HART D.R., HINES A.H., HOUDE E.D., KOLESAR S.E., NIXON S.W., RICE J.A., SECOR D.H. a TARGETT T.E., 2009 - *Nutrient Enrichment And Fisheries Exploitation : Interactive Effects On Estuarine Living Resources And Their Management*. Hydrobiologia, (6291), 31-47.
- BREITBURG D.L., SALISBURY J., BERNHARD J.M., CAI W.J., DUPONT S., DONEY S., KROEKER K., LEVIN L.A., LONG C., MILKE L.M., MILLER S.H., PHELAN B., PASSOW U., SEIBEL B.A., TODGHAM A.E. a TARRANT A., 2015 - *A k tomu všemu... Vyrovnávání se s okyselením oceánů uprostřed mnoha stresorů*. Océanografie 28: 48-61 (2015)
- CABRÉ A., MARINOV I., BERNARDELLO R. a BIANCHI D., 2015 - *Zóny kyslíkového minima v tropickém Pacifiku v modelech Cmp5: Rozdíly v průměrných stavech a trendy klimatických změn*. Biogeosci. Diskutovat: V roce 2015 se uskutečnila mezinárodní konference na téma: Jak se vyvíjejí teploty v Evropě? Special Issue on Low Oxygen Environments (Zvláštní vydání o prostředích s nízkým obsahem kyslíku).
- CAPET A., BECKERS JM, BARTH A., GREGOIRE M., 2013- *Drivers, Mechanisms and Long-Term Variability of Seasonal Hypoxia on the Black Sea Northwestern Shelf - Is there any Recovery after Eutrophication ?* Biogeosciences, 10, 3943-3962.
- CHEUNG W.L. a kol. - *Úbytek ryb zhoršuje dopady globálních změn oceánu na mořské ekosystémy*. Nature Climate Change 3, DOI: 10.1038/NCLIMATE1691.
- DEUTSCH C., FERREL A., SEIBEL B., PORTNER H.O. a HUEY R.B., 2015- *Climate Change Tightens a Metabolic Constraint on Marine Habitats*. Science 348, 1132-1145.
- DIAZ R.J. a ROSENBERG R., 2008- *Šíření mrtvých zón a důsledky pro mořské ekosystémy*. Science, (3215891), 926-929.
- FEELY R.A., SABINE C.L., HERNANDEZ-AYON J.M., IANSON D. a HALES B., 2008- *Evidence For Příliv korozivní "okyselené" vody do kontinentálního šelfu*. Science, (3205882), 1490-1492.
- FEELY R.A., ALIN S.R., NEWTON J., SABINE C.L., WARNER M., DEVOL A., KREMBS C. a MALOY C., *The 2010. Combined Effects of Ocean Acidification, Mixing, and Respiration on Ph and Carbonate Saturation in an Urbanized Estuary*. Estuar. Coast. Shelf Sci., (884), 442-449.



- GARCIA H.E., LOCARNINI R.A., BOYER T.P., ANTONOV J.I., BARANOVA O.K., ZWENG M.M., REAGAN J.R. a JOHNSON D.R., 2014- *World Ocean Atlas Volume 2013, : 3 Dissolved Oxygen, Apparent Oxygen Utilization, and Oxygen Saturation*. S. LEVITUS, Ed., A. Mishonov Technical Ed. ; NOAA Atlas NESDIS pp75,27.
- GATTUSO J.P. et al. - *Kontrastní budoucnost oceánů a společnosti na základě různých scénářů antropogenních emisí CO₂*. Science DOI349, : 10.1126/science.aac4722.
- GILBERT D., SUNDBY B., GOBEIL C., MUCCI A. a TREMBLAY G.H., 2005- *Dvaasedmdesátiletý záznam o ubývání hlubokovodního kyslíku v ústí řeky Svatého Vavřince: souvislost se severozápadním Atlantikem*. Limnol. Oceanography, 50, s. 1654-66.
- GILBERT D., RABALAIS N.N., DIAZ R.J. a ZHANG J. - *Důkazy o větším úbytku kyslíku v pobřežním oceánu než ve volném oceánu*. Biogeosciences, 7, s. 2283-2296.
- GILLY W.F., BEMAN J.M., LITVIN S.Y. a ROBISON B. H., 2013- *Oceanographic and Biological Effects of Shoaling of the Oxygen Minimum Zone*. Ann. Rev. Mar. Sci., 5, 393-420.
- GRAY J.S., WU R.S.S. a OR Y.Y., 2002- *Účinky hypoxie a organického obohacení na pobřežní mořské prostředí*. Mar. Ecol.-Prog. Ser., 238, 249 - 79.
- GRUBER N., 2011 - *Warming Up, Turning Sour, Losing Breath : Ocean Biogeochemistry under Global Change*. Philos. T. Roy. Soc., 1980-1996.369,
- HELM K.P., BINDOFF N.L. a CHURCH J.A., 2011- *Pozorované snížení obsahu kyslíku v globálním oceánu*. Geophys. Res. Lett. 38, DOI: 10.1029/2011GL049513.
- HOFMANN A.F., PELTZER E.T., WALZ P.M. a BREWER P.G., 2011 - *Hypoxie podle stupňů : Zavedení Definice pro měnící se oceán*. Deep-Sea Res. Pt I, (5812), 1212-1226.
- IPCC - FIELD, C.B., BARROS, V.R., MACH, K. a MASTRANDREA, M., 2014 - *Změna klimatu 2014: Dopady, adaptace a zranitelnost*. Příspěvek pracovní skupiny II k páté hodnotící zprávě Mezivládního panelu pro změnu klimatu.
- ITO T., NENES A., JOHNSON M.S., MESKHIDZE M. a DEUTSCH C., 2016- *Zrychlení kyslíku v atmosféře. Snížení počtu tropických druhů v Tichém oceánu v posledních desetiletích vlivem aerosolových znečišťujících látek*. Nature Geoscience 443-447.9,
- KEELING R.F., KÖRTZINGER A. a GRUBER N., 2010- *Odkyselování oceánů v oteplovajícím se světě*. Annu. Rev. Mar. Sci., 2, 199 - 229.
- LAW C.S., BRÉVIERE E., DE LEEUW G., GARÇON V., GUIEU C., KIEBER D.J., KONTRADOWITZ S., PAULMIER A., QUINN P.K., SALTZMAN E.S. STEFELS J. a VON GLASOW R., 2013 - *Evolving Research Directions in Surface Ocean - Lower Atmosphere (Solas) Science*. Environ. Chem, 10, 1-16. <http://dx.doi.org/10.1071/EN12159>.
- LEVIN L.A., 2003 - *Bentos zóny kyslíkového minima : Adaptace a reakce společenstva na hypoxii*. Oceanogr. Mar. Biol. 1-45.41,
- LEVIN L.A. a BREITBURG D.L., 2015- *Propojení pobřeží a moří pro řešení odkyselování oceánů*. Nat. Clim. Chang. 5.
- LEVIN L.A., EKAU W., GOODAY A., JORRISEN F., MIDDELBURG J., NEIRA C., RABALAIS N., NAQVI S.W.A. a ZHANG. J., 2009- *Effects Of Natural And Human-Induced Hypoxia On Coastal Benthos*. Biogeosciences 2063-20986,.
- LEVIN L.A. a LE BRIS N., 2015- *Hluboké oceány v podmínkách změny klimatu*. Science 350: 766-768.
- LONG M.C., DEUTSCH, C. a ITO T., 2016- *Hledání vynucených trendů v oceánském kyslíku*. Global Biogeochem. Cycles, 30, s. 381-397.
- MATEAR R.J., HIRST A.C. a MCNEIL B.I., 2000 - *Changes in Dissolved Oxygen in the Southern Ocean With Climate Change*. Geochem. Geophys. Geosyst., 1 2000GC000086.
- MOFFITT S.E., MOFFITT R.A., SAUTHOFF W., DAVIS C. V., HEWETT K. a HILL T.M., 2015- *Paleoceanographic Insights on Recent Oxygen Minimum Zone Expansion : Lessons for Modern Oceanography*. PloS one, 1, 39.



- MORA C., WEI C.-L., ROLLO A., AMARO T., BACO A.R., BILLET D., BOPP L., CHEN Q., COLLIER M., DANOVARO R., GOODAY A.J., GRUPE B.M., HALLORAN P.R., INGELS J., JONES D.O.B., LEVIN L.A., NAKANO H., NORLING K., RAMIREZ-LLODRA E., REX M., RUHL H.A., SMITH C.R., SWEETMAN A.K., THURBER A.R., TJIPUTRA J.F., USSEGLIO P., WATLING L., WU T. a YASUHURA M., 2013 - *Biotic and Human Vulnerability to Projected Changes in Ocean Biogeochemistry over The 21st Century*. PLoS Biology, (1110) : e1001682. doi : 10.1371/journal.pbio.1001682.
- NOONE K., SUMAILA R. a DÍAZ R.J., 2012 - *Valuing the Ocean Draft Executive Summary*. Stockholmský institut životního prostředí.
- OSCHLIES A., SCHULTZ K.G., RIEBESELL U. a SCHMITTNER A., 2008 - *Simulovaný nárůst exportu biotického uhlíku v oceánské suboxii v 21. století*. Global Biogeochem. Cycles, 22, GB4008, doi : 10.1029/2007GB003147.
- PRINCE E.D. a GOODYEAR C.P., 2006- *Hypoxia-Based Habitat Compression of Tropical Pelagic Fishes*. Ryby. Oceanogr., 451-464.15,
- RABOTYAGOV S.S., KLING C.L., GASSMAN P.W., RABALAIS N.N. a TURNER R.E., 2014- *The Economics of Dead Zones : Causes, Impacts, Policy Challenges, and a Model of the Gulf of Mexico Hypoxic Zone*. Rev.. Environ. Econ. Pol., 8 (1), 58-79.
- REAY D.S., DENTENER F., SMITH P., GRACE J. a FEELY R., 2015 - *Global Nitrogen Deposition and Carbon Sinks*. Nature Geosciences, 1, s. 430-37.
- SCHEFFER M., BARRETT S., CARPENTER S.R., FOLKE C., GREEN A.J., HOLMGREN M., HUGHES T.P., KOSTEN S., VAN DE LEEMPUT I.A., NEPSTAD D.C., VAN NES E.H., PEETERS E.T.H.M. a WALKER B., 2015 - *Creating a Safe Space for Iconic Ecosystems*. Science, 1317-1319.347,
- SPERLING E.A., FRIEDER C.A. a LEVIN L.A. - *Reakce biodiverzity na přirozené gradienty vícenásobných stresorů na kontinentálních okrajích*. Proceeding Royal Society B. 283: 20160637
- STRAMMA L., BRANDT P., SCHAFSTALL J., SCHOTT F., FISCHER J. a KÖRTZINGER A., 2008 - *Zóna kyslíkového minima v severním Atlantiku jižně a východně od Kapverdských ostrovů*. J. Geophys. Res., 113, doi : 10.1029/2007JC004369.
- STRAMMA L., JOHNSON G.C., SPRINTALL J. a MOHRHOLZ V., 2008 - *Expanding Oxygen-Minimum Zones in the Tropical Oceans*. Science, 320,655- 658.
- STRAMMA L., SCHMIDTKO S., LEVIN L.A. a JOHNSON G.C., 2010- *Ocean Oxygen Minima Expansions and their Biological Impacts*. Deep-Sea Res. Pt. I, 57 (4), 587-595.
- STENDARDO I. a GRUBER N., 2012 - *Trendy vývoje kyslíku v severním Atlantiku v průběhu pěti desetiletí*. J. Geophys. Res., 117, doi:10.1029/2012JC007909.
- SYDEMAN W.J., GARCÍA-REYES M., SCHOEMAN D.S., RYKACZEWSKI R.R., THOMPSON S.A., BLACK B.A. a BOGRAD S.J., 2014- *Změna klimatu a zesílení větru v pobřežních ekosystémech*. Science, (3456192), 77-80.
- TAKATANI Y., SASANO D., NAKANO T. a MIDORIKAWA T., 2012- *Pokles rozpuštěného kyslíku po polovině 80. let 20. století v subtropickém gyru západního severního Pacifiku podél opakovaného úseku 137°E*. Global Biogeochemical cycles 26, GB2013, doi:10.1029/2011GB004227.
- VAQUER-SUNYER R. a DUARTE C. M., 2008- *Prahy hypoxie pro mořskou biodiverzitu*. Proc. Natl. Acad. Sci., 105, 15452 - 15457.
- WANG D., GOUHIER T., MENGE B. a GANGULY A., 2015- *Instenzifikace a prostorová homogenizace pobřežního vlnobití v podmínkách změny klimatu*. Nature, 390-394.518,
- WELLS M.L. a kol. , 2015 - *Škodlivé květy řas a změna klimatu: Vědecké poznatky z minulosti a současnosti pro předpověď budoucnosti*. Harmful Algae 49 (2015) 68-93.
- WORLD RESOURCES INSTITUTE - www.wri.org/our-work/project/eutrophication-and-hypoxia/interactive-mapa-eutrofizace-hypoxie.