

NA POČÁTKU

PŮVOD A VÝZNAM KYSLÍKU

Zpočátku na Zemi žádný kyslík nebyl. Před čtyřmi miliardami let jej vzduch pravděpodobně obsahoval asi desetitisícinu procenta. V dnešní atmosféře to je lehce pod 21 procent. Ať už k této změně došlo jakkoli, jedná se o znečištění, které v dějinách pozemského života nemá obdoby. Jako o nečistotě o kyslíku neuvažujeme, protože je pro nás životodárným plynem, bez něhož se neobejdeme. Avšak pro drobné jednobuněčné mikroorganismy, jež na mladé Zemi žily, kyslík rozhodně životodárný nebyl. Byl to jed schopný zabít, a to i ve stopovém množství. I dnes existuje mnoho organismů, které kyslík nesnášejí. Žijí v nehybných močálech, pod mořským dnem, a dokonce i v našich vnitřnostech. Mnohým z nich stačí, aby přišly do kontaktu s kyslíkem v množství přesahujícím desetinu procenta jeho současné atmosférické úrovně, a uhynou. Pro jejich předky, kteří kdysi vládli světu, mělo znečištění vzduchu kyslíkem bezpochyby katastrofální následky. Z vládců světa se smršklí na samotářské tvory žijící v ústraní.

Organismům nesnášejícím kyslík se říká *anaerobní* - nedokážou využívat kyslík a v mnoha případech mohou žít pouze v jeho nepřítomnosti. Problém spočívá v tom, že nemají nic, co by je ochránilo před otravou kyslíkem: disponují jen málem antioxidantů nebo vůbec žádnými. Naproti tomu většina dnešních organismů dokáže vysoké množství kyslíku snášet díky tomu, že jsou antioxidanty doslova napěchované. Zde se ukrývá jeden paradox: jak se u moderních organismů vyvinula antioxidační ochrana? Dle klasického učebnicového názoru se antioxidanty nemohly vyskytovat v prvních buňkách, jež začaly kyslík vypouštět jako toxický odpadní produkt: jak by se asi adaptovaly na plyn, který dosud neexistoval? Nicméně i kdyby byl tento předpoklad správný - tedy, že se antioxidanty vyvinuly až po vzrůstu hladiny atmosférického kyslíku - musel by ohromný vzestup této hladiny představovat pro raný život hodně těžkou výzvu. Pokud měl kyslík na první anaerobní buňky takový účinek jako na jejich dnešní potomky, muselo zřejmě nastat hromadné vymírání anaerobních organismů, jež překonalo i pád dinosaurů.

Proč by nás to mělo zajímat? Podle volnoradikálové teorie stárnutí, kterou jsme vyložili v první kapitole, vymezuje toxicita kyslíku možnosti našeho života. Je-li to pravda, měly by nám způsoby, jak se život v průběhu evolučního času

2. NA POČÁTKU

adaptoval na kyslík, odhalit nová fakta. Skutečně vedlo zvýšení koncentrace atmosférického kyslíku k hromadnému vymírání? Jak se tomu život přizpůsobil? Jestliže jsou stárnutí a smrt zapříčiněny konečným selháním adaptace, můžeme si odnést něco z toho, jak se s touto předpokládanou katastrofou vyrovnali přeživší? Můžeme „udělat něco víc“, ať už dotyční udělali cokoli? V následujících kapitolách se některé z těchto otázek pokusíme zodpovědět zmapováním otázky, jak organismy na měnící se hladinu kyslíku reagovaly v průběhu věků.

Počátky a dějiny raného života přitáhly v posledních několika desetiletích novou vlnu zájmu badatelů. Některé z našich nejzákladnějších představ o vzniku života se úplně převrátily, nicméně staré názory jsou natolik přesvědčivé a hluboce zakořeněné, že se jejich hlavních principů drží i současné učebnice. Zdá se, že mnoho vědců, kteří pracují v jiných oborech, si vůbec neuvědomuje, že dochází k přepisování jejich doktrín. Bude dobré si tu ten starý příběh připomenout, jelikož role přepisovaná kyslíku zdůrazňuje jeho toxicitu.

Ve 20. letech minulého století začali J. B. S. Haldane v Anglii a Alexander Oparin v Rusku nezávisle na sobě uvažovat o možném složení prapůvodní zemské atmosféry. Brali při tom v potaz plyny, o nichž se díky analýze barevného spektra vědělo, že se vyskytují v atmosféře planety Jupiter. Haldane a Oparin tvrdili, že pokud Země společně s Jupiterem a ostatními planetami zkondenzovala z oblaku prachu a plynu, měla by její prvotní atmosféra obsahovat podobně jedovatou směs vodíku, metanu a amoniaku. Jejich názory ve zkoušce časem obstály a staly se základem slavné řady experimentů, které v 50. letech ve Spojených státech provedli Stanley Miller a Harold Urey. Miller a Urey nechali plynnou atmosférou sestávající ze tří „jupiterských“ plynů procházet elektrické jiskry (simulující blesky) a zachytili výsledné produkty. Objevili komplexní směs organických sloučenin, včetně značného procenta aminokyselin (z nichž všechny živé organismy vyrábějí bílkoviny, základní stavební kameny života). Prohlásili, že těmito reakcemi se rané oceány mohly změnit v řídkou organickou polévku obsahující všechny chemické sloučeniny předznamenávající život. Jedinými dalšími přísadami nutnými pro to, aby z této polévky vykrytalizoval život, byly náhoda a čas, přičemž se zdálo, že množství obojího je prakticky neomezené: planeta je stará 4,5 miliardy let a první fosilie velkých živočichů pocházejí z éry před půlmiliardou let. Čtyři miliardy let byly dostatečně dlouhá doba.

Výběr plynů, s nimiž se pracovalo, dával smysl z praktického i teoretického hlediska. Vodík, metan a amoniak nemají za přítomnosti kyslíku a světla dlouhou životnost. Směs začne oxidovat, a jakmile se to stane, vznikne řada organických sloučenin. Z chemického hlediska představuje proces zvaný *oxidace*

odjímání elektronů z atomu či molekuly. Opačný děj, obnášející přidávání elektronů, se nazývá *redukce*.

Oxidace (okysličování) byla pojmenována podle kyslíku (oxygenium), který vyniká v odebrání elektronů molekulám. Pro lepší zapamatování o něm uvažujte jako o čemsi leptavém či ničivém, jako je třeba přípravek na odstraňování barvy. Při oxidaci dochází k odebrání elektronového nátěru, kdežto redukce působí jako nanášení čerstvé barvy. Podstatné je, že kyslík dokáže molekulám odebrat elektrony a že molekuly, jež své elektrony nabízejí jako obětinu, se během tohoto procesu často rozpadnou. Dnes buňky čelí tomuto typu poškození pomocí antioxidantů, avšak na začátku žádné antioxidanty k dispozici nebyly. V takové situaci by volný kyslík představoval nepřekonatelný problém, jelikož veškeré organické molekuly či rodící se formy života by se v přítomnosti kyslíku rozpadly. Fakt, že vznikl život, může znamenat jediné, a sice že tu žádný kyslík nebyl.

První buňky se tedy pravděpodobně vyvinuly v bezkyslíkaté atmosféře a energii musely vyrábět bez příspěvku kyslíku. To se vzhledem k faktu, že Louis Pasteur na konci 19. století popsal fermentaci (kvašení) jako „život bez kyslíku“, a následný výzkum mu dal za pravdu, jevílo jako rozumný předpoklad. Jelikož jsou kvasinky a mnohé jiné jednobuněčné organismy na fermentaci energeticky závislé a mají jednoduchou stavbu, dospěli vědci k předpokladu, že jde o pozůstatky starobylého života. Dle této teorie si jednobuněčný život musel energii zajišťovat fermentací organických sloučenin rozpuštěných v oceánech, dokud nebyl evolučně nahrazen prvními fotosyntetizujícími bakteriemi, které uvolňovaly kyslík – sinicemi (kdysi nesprávně nazývanými sinné [= modré] řasy).

Sinice se naučily využívat sluneční energii. Byť jsou jejich rozměry mikroskopické, nepředstavitelně obrovské množství sinic (do kapky vody se jich vejde několik miliard) v průběhu věků nenápadně znečišťovalo prostředí jedovatým kyslíkovým odpadem. Zpočátku kyslík reagoval s minerály, jež byly rozpuštěné v oceánech nebo se erozí uvolnily z hornin, způsoboval jejich oxidaci a zůstal vázaný v minerálních sloučeninách. Tyto obrovské přírodní zdroje fungovaly stovky milionů let jako štít před volným kyslíkem. Nakonec však tento štít zcela zoxidoval. Poněvadž už nezbylo nic, co by pomohlo, začal přebytek kyslíku znenadání (z hlediska geologického času) zamořovat atmosféru i oceány. Cena byla strašlivá – kyslíkový holokaust (též kyslíková krize či kyslíková revoluce). Jak v roce 1986 napsala význačná profesorka biologie z Massachusettské univerzity Lynn Margulisová:

Byla to největší krize, jakou kdy planeta přestála. Mnoho druhů mikrobů okamžitě zaniklo. Mikrobiální život neměl proti tomuto kataklyzmatu žádnou jinou obranu než klasickou cestu v podobě replikace a duplikace DNA, genového přenosu

2. NA POČÁTKU

či mutací. Z rozsáhlého vymírání bakterií a zdokonalení bakteriální sexuality [nejde o pohlavní rozmnožování, byť dochází k přenosu genetické informace], která se typicky vyskytuje u bakterií vystavených jedovatým látkám, vyplynula reorganizace superorganismu, jež nazýváme mikrokosmem. Nové odolné bakterie se množily a na zemském povrchu rychle nahradily ty citlivé na kyslík. Pod nimi, v anaerobních vrstvách bahna a půdy, však některé bakterie přežily. Z holokaustu, který konkuruje tomu jadernému, jehož se obáváme dnes, vzešla jedna z nejpůsobivějších a nejdůležitějších revolucí v dějinách života.

Podle tohoto pohledu nevyšel úspěch nového světového řádu toliko ze schopnosti mikroorganismů snášet jedovatost kyslíku, ale z fantastického evolučního mistrovského kousku, během nějž se buňky staly závislými na smrtícím jedu. Obyvatelům nového lepšího světa dodával energii kyslík.

Stará teorie pokračuje následovně: naše závislost na kyslíku zamlžuje fakt, že se jedná o toxický plyn, úzce spjatý se stárnutím a smrtí, nemluvě o nebezpečí požáru. V průběhu evoluce ovlivňovala reaktivita kyslíku jeho hromadění v atmosféře. Říká se, že od rozpuku mnohobuněčného života někdy před 550 miliony let se hladina atmosférického kyslíku ustálila na asi 21 procentech, kterážto hodnota je výsledkem udržitelné přírodní rovnováhy. Pokud se koncentrace kyslíku zvýší příliš, potlačí jeho toxicita růst rostlin. V důsledku jeho množství produkované fotosyntézou klesne, což hladinu atmosférického kyslíku zase sníží. Tvrdí se, že v atmosféře obsahující přes 25 procent kyslíku by i ve vlhkých deštných pralesích vypukly rozsáhlé požáry. Kdyby jeho hladina naopak klesla pod 15 procent, zvířata by se dusila a zapálit by se nedaly ani suché větve. Souvislý, 350 milionů let dlouhý záznam fosilního dřevěného uhlí (fusinitu) v usazených horninách naznačuje, že Země neustále zachvacovaly požáry. Pokud je to pravda, hladina kyslíku nikdy neklesla pod 15 procent. Biosféra tedy množství atmosférického kyslíku po celý moderní věk rostlin a živočichů udržovala na úrovni, která byla pro ni samotnou příjemná.

Tak zní příběh, na kterém jsem vyrostl. Z větší části je dodnes přijímaný, nebo se přinejmenším nezpochybňuje. Většina tvrzení, třebaže založených na poněkud skromných důkazech, zní z biologického hlediska věrohodně. Abychom to shrnuli: život se chemickou evolucí vyvinul v prebiotické polévce, která vznikala z planetární atmosféry obsahující metan, amoniak a vodík. První buňky tuto polévku fermentovaly, dokud je nenahradily sinice, jež využívaly sluneční energii k pohonu fotosyntézy a uvolňovaly kyslík jako odpadní produkt. Tento jedovatý plyn oxidoval horniny a oceány, a nakonec se začal hromadit v atmosféře. V důsledku toho se stal příčinou apokalyptického vymírání, kyslíkového holokaustu. Z popela povstal nový světový řád, který byl závislý na stejném plynu,

jenž vyhladil jeho předchůdce. Energii dodával novému řádu kyslík. Přesto toxicita a reaktivita kyslíku biosféru přinutila, aby jeho obsah v atmosféře držela na 21 procentech.

Tenhle příběh byl v mé hlavě ukotvený tak pevně, že mě až rozhořčilo, když jsem v televizi zaslechl prohlášení, že hladina kyslíku kdysi dosahovala 35 procent – konkrétně v období karbonu před asi 300 miliony let. Nesmysl, pomyslel jsem si! Všechno by shořelo! Rostliny by přestaly růst! Nebyl jsem jediný. Třebaže tuto myšlenku podporovali geochemici světového významu, širší geologická i biologická komunita se jí zpočátku vysmívala. Až když jsem se tématem začal zabývat, dospěl jsem k přesvědčení, že revizionisti měli pravdu. Mnohé z těch myšlenek zůstávají sporné a většina jednotlivých důkazů vykazuje určité nedostatky, nicméně jedna světlá stránka tu je: v posledních dvou desetiletích jsme se posunuli z oblasti „geopoezie“ do nové éry molekulárních důkazů, jež podporují nové modely globální změny. Celkově vzato jsem dospěl k názoru, že důkazy jsou přesvědčivé, i když nový příběh naprosto odporuje myšlence jedovatosti kyslíku, a někdy vlastně i zdravému rozumu.

Než se podíváme na důkazy a položíme si otázku, jak ovlivňují náš současný život, měli bychom se znovu zorientovat ve vznikajícím obrazu. Téměř každý krok mého předchozího shrnutí se obrátil naruby. Podle nového příběhu se život nemusel zrodit z prebiotické polévky, ale daleko odsud, v horkých sirných průduších uprostřed hlubokomořských příkopů, v takzvaných černých kuřácích. Předpokládá se, že poslední společný předek všeho živého, láskyplně označovaný jako LUCA (podle *Last Universal Common Ancestor* – poslední univerzální společný předek), využíval k dýchání stopová množství kyslíku, a to ještě předtím, než se jeho potomci naučili fotosyntézu (nebo přinejmenším produkovat kyslík). Má se za to, že místo aby se první buňky protloukaly životem pomocí fermentace, získávaly energii z řady anorganických prvků a sloučenin, například dusičnanů, dusitanů, síranů a siřičitanů – a kyslíku. Pokud tomu tak bylo, znamená to, že LUCA byla vůči kyslíku odolná dřív, než se ve vzduchu jakýkoli volný kyslík objevil. Její potomci, třeba sinice, měli podle všeho podobnou ochranu proti svému odpadnímu produktu, takže nepodlehli kyslíkovému holokaustu.

Ve skutečnosti nemáme žádný spolehlivý důkaz, že kyslík hromadné vymírání kdy zapříčinil. Zdá se, že místo aby hladina kyslíku rychle stoupla na rovnovážnou úroveň řízenou biosférou, probíhalo okysličování Země v sérii prudkých skoků či pulzů, přičemž každý z nich byl vyvolán nebiologickými činiteli, například deskovou tektonikou a zaledňováním. Každý nárůst množství atmosférického kyslíku provázela bohatá biologická „radiace“, během níž se život rozšířil a zaplnil volné ekologické niky – stejně jako když prázdné prerie podněcovaly osídlování amerického Západu. Nárůst množství kyslíku ve vzduchu bezprostředně předcházel rozmachu jednobuněčných *eukaryot* – buněk obsahujících

2. NA POČÁTKU

jádro - které jsou buněčnými předky všech mnohobuněčných organismů, včetně nás. Podobné zvýšení hladiny kyslíku předznamenalo prudký vzestup mnohobuněčných rostlin a živočichů na počátku kambria (období, jež začalo před 543 miliony let) a evoluci gigantického hmyzu a rostlin v karbonu a raném (spodním) permu (před 320–270 miliony let). A možná dokonce předznamenalo i nástup dinosaurů. Několik hromadných vymírání se naproti tomu pojí s obdobími poklesu hladiny kyslíku, včetně „matky všech vymírání“ na konci permu (před asi 250 miliony let). Neodvratný závěr, totiž že kyslík je dobrá věc, možná několika lidem přivodil bezesnou noc, každopádně nám pomůže udržet na uzdě představy o jedovatosti kyslíku a její souvislosti se stárnutím či chorobami.

První posvátnou krávou, která byla obětována, byla podobnost ve složení prvotní zemské atmosféry s atmosférou Jupiteru. Ve skutečnosti se život musel vyvinout v atmosféře, která obsahovala velmi málo metanu, vodíku a amoniaku. Přímé důkazy, které tento fakt dokládají, pramení z geologie.

Země a Měsíc se zformovaly před 4,5 miliardami let. Stáří měsíčních kráterů, stanovené na základě vzorků přivezených z misí Apollo, naznačuje, že naši planetární soustavu přinejmenším 500 milionů let bombardovaly meteority. Bombardování skončilo někdy před 3,8 až 4 miliardami let. Nejstarší sedimentární horniny na Zemi, jež se usazovaly v oblasti, která dnes tvoří západní pobřeží Grónska, dle spolehlivé analýzy pocházejí z doby před 3,85 miliardami let - vznikaly tedy pouze 700 milionů let po zformování Země a bezpochyby nijak dlouho po konci bombardování.

Navzdory své starobylosti tyto dávné horniny naznačují, že tehdejší atmosféra a koloběh vody se překvapivě podobaly současnosti. Fakt, že tyto horniny byly kdysi usazeninami, napovídá, že se ukládaly pod rozsáhlou vodní plochou. Jejich erozi podle všeho způsobila dešťová voda z pevniny. To redukuje potenciální teploty do rozmezí slučitelného s vypařováním, tvorbou mraků a srážkami. Minerální složení horniny nám umožňuje informovaně odhadnout skladbu tehdejšího vzduchu. Máme tu uhličitany, které pravděpodobně vznikly reakcí oxidu uhličitého s křemičitany, jak se to děje i dnes: můžeme proto předpokládat, že vzduch obsahoval oxid uhličitý. V horninách se rovněž nacházejí různé oxidy železa, které se z chemického hlediska nemohly utvářet za podmínek podobných těm na Jupiteru, ale stejně tak by neexistovaly, kdyby se tu vyskytovalo vyšší než stopové množství kyslíku. Můžeme z toho vyvodit, že kyslík nebyl v té době více než stopovým plynem. Konečně musíme také předpokládat, že hlavní složkou vzduchu byl tehdy, podobně jako dnes, dusík, jelikož tento prvek je v plynné formě téměř netečný (inertní) a živí tvorové jej nedokážou produkovat

ve velkém množství. Atmosféru takto bohatou na dusík nemůže vytvořit žádný chemický ani biologický proces, takže musela existovat celou dobu. Z toho plyne, že atmosféra Země před téměř 4 miliardami let sestávala tak jako dnes převážně z dusíku, doplněného trochou oxidu uhličitého, vodní páry a stopovým množstvím dalších plynů, například kyslíku. Nebyl zde v podstatě žádný metan, amoniak ani vodík.

Tyto predikce, založené na nejstarších horninách, mají oporu i v druhé linii důkazů, která napovídá něco o původu rané atmosféry. Na mysli máme vzácnost inertních nereaktivních plynů – zejména neonu – v dnešní atmosféře Země. Neon je sedmým nejrozšířenějším prvkem ve vesmíru. Hojně se vyskytoval i v prachoplynovém mračnu, z něž zkondenzovala Země a ostatní planety Sluneční soustavy. Coby netečný plyn je neon ještě méně reaktivní než dusík. Pokud bombardování meteority nějaká část původní atmosféry Země přečkala, měla by obsahovat zhruba stejné množství neonu a dusíku. Ve skutečnosti je poměr neonu vůči dusíku 1 ku 60 000. Jestliže na Zemi někdy byla atmosféra podobná té na Jupiteru, musela zmizet během prvního divokého období meteoritického bombardování.

Odkud tedy pochází naše dnešní atmosféra? Zdá se, že odpovědi jsou sopky. Kromě toho, že vypouštějí sírné výpary (jež by se vysrážely v dešti), obsahují jejich plyny také dusík a oxid uhličitý (ve zhruba správném poměru), malé množství neonu a téměř žádný metan, amoniak či kyslík.

Odkud se tedy kyslík vzal? Existují pouze dva možné zdroje atmosférického kyslíku. Zdaleka nejdůležitějším je *fotosyntéza*, děj, při němž rostliny, řasy a sinice využívají energii slunečního záření zachycovanou zeleným pigmentem chlorofylem k rozštěpení vody. Štěpení vody uvolňuje kyslík, který je vypouštěn do atmosféry jako odpadní produkt, zatímco energeticky bohaté sloučeniny získané štěpením (díky absorpci světelné energie) se využijí k navázání vzdušného oxidu uhličitého a jeho zabalení do sacharidů, tuků, bílkovin a nukleových kyselin, z nichž sestává organická hmota. Fotosyntéza tedy využívá sluneční světlo, vodu a oxid uhličitý k tvorbě organické hmoty. A jako odpadní produkt uvolňuje kyslík.

Pokud by byla fotosyntéza jediným životním dějem na planetě, kyslíku by ve vzduchu přibývalo, dokud by rostliny nespotřebovaly veškerý dostupný oxid uhličitý. Potom by se všechno zaseklo. To se očividně nestalo. Ve skutečnosti existuje mnoho procesů, které mohou kyslík spotřebovat, včetně jeho reakcí s minerály obsaženými v horninách či oceánech a se sopečnými plyny. Dnes se však téměř veškerý kyslík vyprodukovaný rostlinami spotřebuje při *dýchání* (*respiraci*) živočichů, hub a bakterii, jež kyslík používají při „spalování“, respektive oxidaci organických materiálů, které přijímají v potravě – získávají tak energii

2. NA POČÁTKU

pro potřeby organismu a zpátky do vzduchu uvolňují oxid uhličitý.* [Když mluvíme o dýchání/respiraci, obvykle máme na mysli buněčné dýchání, tedy biochemický proces probíhající u eukaryot v mitochondriích, nikoli ventilaci, tedy výměnu plynů mezi organismem a okolím.] Jelikož živočichové, bakterie i houby konzumují organickou hmotu pocházející z jiných organismů, mluvíme o nich společně jako o *konzumentech*. Podle definice získávají konzumenti energii respirací (řízeným spalováním) sacharidů, tuků a bílkovin vytvořených primárními fotosyntetizujícími *producenty*. Celkově je dýchání jako reakce, při níž se spotřebovávají sacharidy a kyslík a jako odpadní produkty vznikají oxid uhličitý a voda, téměř přesným opakem fotosyntézy a spotřebovává v podstatě stejné množství kyslíku, jaké vzniká fotosyntézou. Spalováním potravy, kterou zkonsumujeme, se nejenže spotřebovává kyslík, ale zároveň obnovuje oxid uhličitý nezbytný k pokračování fotosyntézy. Jakkoli se můžeme cítit jako paraziti, rostliny nás potřebují stejně jako my je.

Pokud by konzumenti spořádali veškerou organickou hmotu vytvořenou primárními producenty, veškerý kyslík uvolněný do vzduchu dýcháním by se spotřeboval. To má kupodivu velmi blízko realitě. Kyslík uvolněný fotosyntézou je téměř beze zbytku (99,99 procent) využíván živočichy, houbami a bakteriemi, jež se živí pozůstatky producentů nebo sebou navzájem. Avšak zdánlivě nepodstatná odchylka o velikosti 0,01 procenta je ve skutečnosti zodpovědná za veškerý život, jak jej známe. Tato odchylka reprezentuje organickou hmotu, která se nespálí, ale naopak zůstane pohřbená v usazeninách. Za miliardy let to dává dohromady ohromné množství pohřbené organické hmoty.

Pakliže jsou organické zbytky místo zkonsumování pohřbeny, zabraňuje se tím úplnému znovupohlcení kyslíku konzumenty** a zbylý kyslík se hromadí v atmosféře. Téměř všechen drahocenný kyslík pochází z 3 miliardy let trvajícího nesouladu mezi množstvím kyslíku vytvořeného primárními producenty a množstvím spotřebovaného konzumenty. Obrovský objem odumřelé organické hmoty pohřbené v horninách převyšuje úhrnný obsah uhlíku v celém živém světě. Robert Berner, geochemik z Yaleovy univerzity, odhaduje, že v zemské kůře je pohřbeno 26 000krát víc uhlíku, než kolik ho je v živé biosféře. Jinak řečeno to znamená, že veškerá živá hmota obsahuje pouze 0,004 procenta organického uhlíku, který se dnes na Zemi nachází. Kdyby pohřbená organická hmota reagovala s kyslíkem, žádný by už nezbyl. Pokud by s atmosférickým kys-

* I rostliny, řasy a sinice dýchají a část kyslíku uvolněného během fotosyntézy spotřebovávají ke spalování sacharidů, jež vyprodukovaly fotosyntézou, a k získání energie, která je v nich uložena.

** Pro čtenáře holdující chemii dodejme, že souhrnnou rovnicí fotosyntézy lze zapsat jako $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_2\text{O}$ (organický uhlík ve formě sacharidu) + O_2 . Dýchání lze zapsat jako reakci v opačném směru. To znamená, že na každou molekulu CH_2O (nebo její ekvivalent v jiné organické hmotě), která je pohřbená, nikoli spálena dýcháním, zůstane ve vzduchu jedna molekula O_2 .

líkem reagovala pouhá 0,004 procenta veškerého organického uhlíku – jinými slovy celá současná biosféra – zbylo by ho 99,996 procent. Takže i nejzbrklejší ničení světových lesů by jen stěží ohrozilo naše zásoby kyslíku. Dodejme ale, že takové krátkozraké a mimořádně hloupé chování by bylo nepopsatelnou tragédií z jiných důvodů.

Pohřbená organická hmota na sebe bere podobu uhlí, ropy či zemního plynu, a také méně zjevných pozůstatků promíchaných se sedimenty a minerály, jako je třeba pyrit neboli kočičí zlato. Obyčejné pískovcové skály, které vůbec nevytvářejí, že by zadržovaly nějaký uhlík, obvykle obsahují několik procent organického uhlíku. Jelikož jsou tyto horniny velmi běžné, zodpovídají za většinu organického uhlíku pohřbeného v zemské kůře. Ve formě fosilních paliv je dostupná pouze malá část pohřbené hmoty. To znamená, že i kdyby se nám podařilo spálit veškeré uhlí, ropu a zemní plyn uvězněné v zemské kůře, stejně bychom spotřebovali jen několik procent atmosférického kyslíku.

Původním zdrojem kyslíku v atmosféře ovšem nebyla biologická fotosyntéza, nýbrž její chemický protějšek. Jen málo procesů tak nezasřtěně ukazuje, jaký význam má *rychlost* reakce a jak zásadní dopad může mít na tuto rychlost život. Sluneční energie, zejména ultrafialové záření, může štěpit vodu a vytvářet vodík a kyslík, aniž by byl potřebný biologický katalyzátor. Plyný vodík je dostatečně lehký, aby unikl gravitaci Země. Kyslík, což je mnohem těžší plyn, gravitace zadrží, takže zůstane v atmosféře. Většina kyslíku, jenž tímto způsobem vznikl na rané Zemi, reagovala se železem v horninách a oceánech a zůstala navždy uvězněná v kůře. Výsledkem byla ztráta vody, poněvadž po tom, co se rozštěpila, unikl vodík do vesmíru a kyslík byl pohlcen zemskou kůrou, místo aby se hromadil ve vzduchu.

Předpokládá se, že ztráta vody v důsledku činnosti ultrafialového záření může být důvodem, proč nejsou na Marsu a Venuši oceány.* Dnes jsou obě planety suché a sterilní, jejich kůra zoxidovala a jejich atmosféry jsou plné oxidu uhličitého. Obě planety oxidovaly pomalu a nikdy v atmosféře neshromáždily víc než stopové množství kyslíku. Proč se to stalo na Marsu a Venuši, ale na Zemi ne? Klíčovým rozdílem může být rychlost tvorby kyslíku. Pokud kyslík vzniká pomalu, pomaleji, než je rychlost, jakou zvětrávání a vulkanická činnost obnažují nové horniny či minerály a uvolňují nové plyny, pak všechen kyslík, místo aby se hromadil ve vzduchu, pohltí kůra. Kůra bude pozvolna oxidovat, ale kyslík

* Sonda Mars Global Surveyor, která od dubna 1999 kroužila kolem rudé planety, poslala na Zemi detailní snímky sedimentárních hornin, o nichž vědci z NASA prohlásili, že se pravděpodobně vytvořily v jezerech a mělkých mořích. Už dávno byly popsány erozní kanály ukazující, že na Marsu se někdy v minulosti vyskytovala tekoucí voda, avšak nové snímky poskytly první spolehlivý důkaz, že tam kdysi existovaly oceány. Jestli potom odtékly pod povrch planety, nebo se vypařily do vesmíru, popřípadě obojí, zatím nevíme.

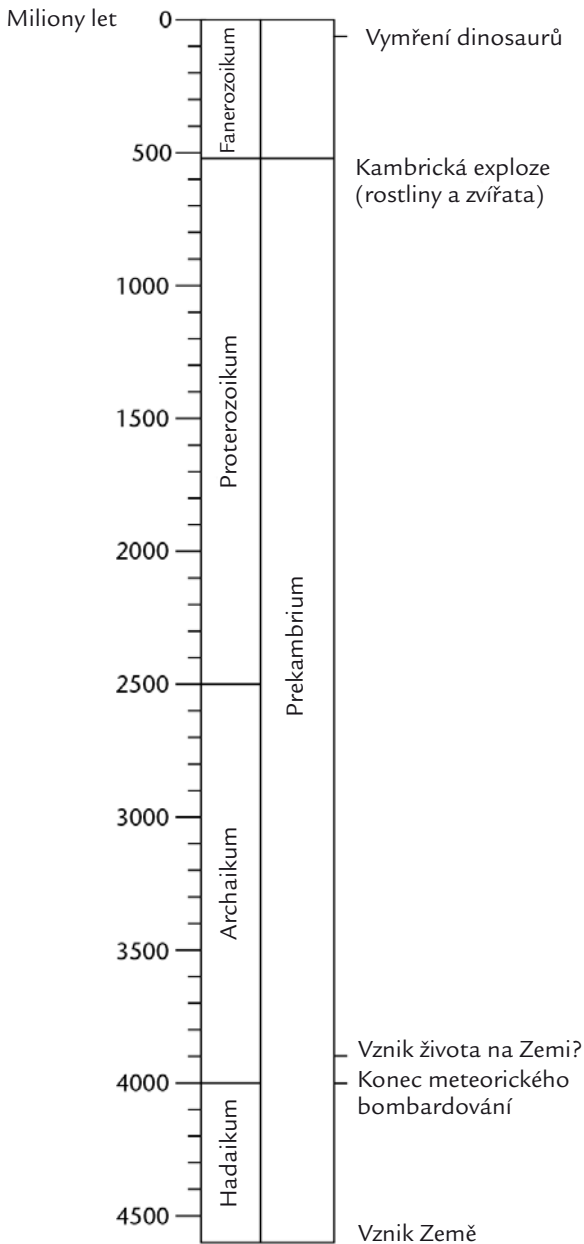
2. NA POČÁTKU

se ve vzduchu nikdy nenahromadí. Ve vzduchu se může začít shromažďovat pouze v případě, že se tvoří rychleji, než se odhalují nové horniny a minerály.

Zemi před sterilním osudem Marsu a Venuše uchránil sám život. Kyslík z fotosyntézy zaplavil dostupné odhalené reaktanty v zemské kůře a oceánech a umožnil, aby se plyn hromadil v atmosféře. Jakmile tu byl volný kyslík, zamezil ztrátám vody. To proto, že reagoval s většinou vodíku, jenž se vyštěpil z vody, a vodu tak obnovoval, čímž na Zemi zachoval oceány. Otec hypotézy Gaia a výjimečný vědec James Lovelock odhadl, že dnes, kdy je ve vzduchu kyslík, uniká do vesmíru asi 300 000 tun vodíku ročně. To se rovná roční ztrátě téměř 3 milionů tun vody. Ačkoli to může znít znepokojivě, Lovelock spočítal, že při této rychlosti by ztráta jednoho jediného procenta oceánů trvala 4,5 miliardy let. Za tuto ochranu můžeme poděkovat fotosyntéze. Jestli někdy existoval život na Marsu či Venuši, můžeme si být jistí, že se nikdy nenaučil divy fotosyntézy. V pravém slova smyslu lze naši současnou existenci přičíst ranému vzniku fotosyntézy na Zemi a rychlému přísunu kyslíku do atmosféry v důsledku činnosti biologického katalyzátoru.

Počátek života na Zemi přesahuje záběr této knihy. Čtenáře, jež tohle téma zajímá, odkazují na dílo Paula Daviese, Grahama Cairnse-Smithe a Freemana Dysona, uvedené v doporučené literatuře. Předpokládejme, že život se vyvinul v oceánu planety obklopené atmosférou složenou z dusíku a oxidu uhličitého, ale jen se stopovým množstvím kyslíku. Brzy pravděpodobně začala probíhat fotosyntéza. K otázce, jak a proč se tak stalo, se vrátíme v sedmé kapitole. Zatím zmapujeme, jak život reagoval na výzvu v podobě rostoucí hladiny kyslíku, když fotosyntéza tento plyn napumpovala do vzduchu a oceánů. Zavinilo kyslíkové znečištění apokalyptické vymírání, jak postulovala Lynn Margulisová a jiní, nebo podnítilo vznikání evolučních novinek? Zbyl tak dlouho po oné události nějaký důkaz, který by kterékoli z obou vysvětlení podpořil?

Již v 60. letech minulého století hodil rukavici Preston Cloud, jeden z průkopníků geochemie. I po ohromném technologickém pokroku, jež obor od té doby prodělal, jsou Cloudovy práce i názory dodnes vlivné. Tvrdil, že hlavní události raných fází evoluce byly spřažené se změnami obsahu kyslíku ve vzduchu. Kdykoli hladina kyslíku vzrostla, zareagoval život rozkvětem. Sám Cloud navrhl tři kritéria pro ověření této hypotézy: musíme přesně vědět, jak a kdy se úroveň kyslíku měnila; musíme ukázat, že k adaptacím živého došlo právě v této době; a musíme mít dobrý, biologicky podložený důvod k propojení změny hladiny kyslíku a evoluční adaptace. Nakolik je ve světle nových důkazů Cloudova hypotéza pravdivá, bude námětem následujících tří kapitol.



Obrázek 1: Geologická časová osa od zformování Země před 4,6 miliardami let po současnost. Všimněte si nesmírné délky prekambria. První rostliny a živočichové se objevili přibližně v době kambrické exploze před 541 miliony let. Dinosauri vymřeli asi před 66 miliony let.

2. NA POČÁTKU

Aby pro nás byl vytyčený úkol zvládnutelnější, rozdělíme si historii Země do tří nestejných částí (obrázek 1). Nejprve přichází prekambrium, dlouhé a tiché období, kdy se v horninách ještě neobjevují žádné viditelné fosilie, vyjma váhavého experimentování s mnohobuněčným životem v samém závěru této éry. Potom přichází takzvaná kambrická exploze, kdy se mnohobuněčný život, plně zformovaný a obrněný (v tomto případě šlo o schránky), ve fosilním záznamu objevil náhle, jako když Diovi vyskočila z hlavy Athéna. Nakonec tu máme fa-nerozoikum, „současné“ období suchozemských rostlin, živočichů a hub, kdy se na Zemi postupně objevili trilobiti, amoniti, dinosauři a savci. Podmínky, jež tuto explozi mnohobuněčného života umožnily, nastaly už v prekambriu. Proto se touto periodou budeme zabývat ve třetí kapitole a kambrickou explozí i fa-nerozoikem v kapitolách 4 a 5.