

Základní pojmy z ekologie

Provisorní učební text pro předmět Toxikologie a ekologie

Igor Linhart

1 Co je ekologie

Ekologie byla jako samostatná vědní disciplína založena teprve v r. 1910 na botanickém kongresu v Bruselu. Bylo to ovšem jen formální uznání oboru vědeckého zkoumání, které do té doby spadal do biologie jako vědy o životě a živých organismech, ale který čistou biologii přesahoval svým interdisciplinárním charakterem.

Samotný pojem ekologie poprvé použil německý biolog Emil Hückel v r. 1866. Je odvozen z řeckého oikos (οἶκος = dům) a logos (λογος = slovo, zákon, věda). **Ekologie studuje vztahy mezi živými organismy a prostředím, ve kterém žijí včetně vztahů mezi živými organismy navzájem.** Zkoumá toky hmoty, energie a informací v prostředí, kde žijí živé organismy. Toto prostředí spolu s v něm žijícími organismy tvoří celek, který se v ekologii nazývá ekosystém. **Ekosystém je tedy soubor živých organismů žijících v určitém prostředí v určitém, která tvoří s tímto prostředím, s jeho neživými složkami, určitý vymezený celek.** Ekosystém je vymezen hranicemi, přes které sice také probíhá výměna hmoty a energie, ale ve výrazně menší míře než uvnitř ekosystému. Například ekosystém lesa, louky, jezera, atd. Na přechodu mezi ekosystémy bývají hraniční, přechodová pásma, která se nazývají ekotony. Největším známým ekosystémem je Země. Ani ta není ekosystémem izolovaným, vyměňuje s okolím hmotu a energii.

Pojem ekologie bývá často spojován s rozmanitými hnutími na ochranu životního prostředí. Je to ovšem nepřesné a zavádějící. Ekologie totiž není vědou o životním prostředí, i když s ní souvisí. **Nauka o životním prostředí, environmentalistika**, je aplikovanou disciplínou, která z ekologie vychází. Zaměřuje se na faktory, které životní prostředí poškozují a hledá způsoby, jak škody na ekosystémech minimalizovat a životní prostředí chránit. Laickým hnutím na ochranu přírody by proto nemělo nepříslušet označení vžité *ekologové*, které je s nimi obvykle spojováno, ale spíš environmentalisté nebo ekologičtí aktivisté. Na druhé straně vědečtí ekologové nemusí nutně být zrovna ekologickými aktivisty.

Environmentální hnutí má své kořeny v polovině 20. století, kdy si mnoho lidí začalo uvědomovat, či spíš tušit, že lidská činnosti, průmyslová i zemědělská, má značný a často negativní vliv na prostředí s negativními dopady na živé organismy, které v tomto prostředí žijí, včetně člověka. Na jeho počátku stála kniha americké oceánoložky Rachel Carson *Silent Spring* (Tiché jaro, tedy jaro bez ptačího zpěvu), která poprvé vyšla r. 1962. Autorka v ní popisuje úbytek orlů bělohlavých a drozdů stěhovavých, který přičítá masovému používání DDT. DDT (1-bis(4-chlorfenyl)-2,2,2-trichlorethan) byl v 50-tých letech 20. století oblíbeným prostředkem k hubení hmyzu, který je málo toxický pro člověka a savce. Špatně se biologicky odbourává a působí neurotoxicky (především na hmyz) tím, že narušuje transport vápenatých iontů přes buněčné membrány neuronů. S tím souvisí také jeho účinek na populace ptáků. Látka se zakoncentrovává v potravním řetězci (viz. příslušná kapitola tohoto textu) a u ptáků narušuje tvorbu vaječných skořápek, které obsahují uhličitán vápenatý. Skořápky jsou pak měkké, takže neudrží tíhu hnízdící samičky. Autorka bila na poplach, obávala se vyhynutí orla bělohlavého, erbovního ptáka Spojených států a drozda stěhovavého, ptáka, který svým zpěvem ohlašuje jaro a dalších ptáků. Kniha měla ve Spojených státech a později i v ostatních zemích obrovský emotivní účinek. Jaro bez ptáků, dokonce bez

symbolického ptáka Ameriky, Američany otřásl. Používání DDT bylo v USA zakázáno. Později se zákaz rozšířil Stockholmskou úmluvou na mnoho dalších zemí celého světa.

Kniha dodnes budí vášnivé reakce. Odpůrci jí vyčítají, že nepravdivými argumenty vyvolala přehnanou reakci veřejnosti a posléze také odpovědných orgánů (v USA byla stimulem k založení US Environmental Protection Agency) a DDT spolu s dalšími persistentními insekticidy byl zakázán neodůvodněně. Zákaz měl podle některých odpůrců na svědomí až 80 milionů obětí na životech, tedy údajně "více než Mein Kampf".

DDT ovšem není a nikdy nebylo jediným prostředkem boje proti malárii a ať s DDT nebo bez něj, malárii se dosud nikdy zcela vymítit nepodařilo. Ve skutečnosti některé státy DDT nikdy nezakázaly a jiné se k němu zas vrátily, protože je to laciný a velmi účinný insekticid k hubení přenašečů malárie a chudé země Afriky a Asie si nemohou dovolit nákladnější prostředky (včasnou léčbu, prevenci). Tvrdit tedy, že za údajných 80 milionů obětí malárie může výlučně jedna kniha je čirou demagogií. Historie DDT však ukazuje, že při radikálních politických rozhodnutích, jako jsou zákazy použití nějaké látky, je třeba brát do úvahy nikoli jen rizika plynoucí z používání dané látky, ale i její přínosy pro společnost a to nejen ty čistě ekonomické.

Vyhodnotit ekologické a jiné dopady faktorů ovlivňujících životní prostředí asi vždy bude předmětem sporů, neboť problém je obvykle příliš komplikovaný na to, aby bylo možné jednoznačně a nesporně předvídat, k čemu určité regulační opatření povede. Z toho však nelze vyvozovat, že taková opatření jsou *a priori* nesmyslná a že nejlepší je nechat věcem volný průběh. Jako jedinec tak ani lidské společenství (obec, stát) se prakticky nemůže vyhnout rozhodnutím, jejichž všechny dopady předem nezná (ostatně nedělat nic je také rozhodnutí). Lze tak spoléhat jedině na schopnost špatná rozhodnutí korigovat, tedy na zpětnou vazbu.

2 Živé a neživé složky ekosystému

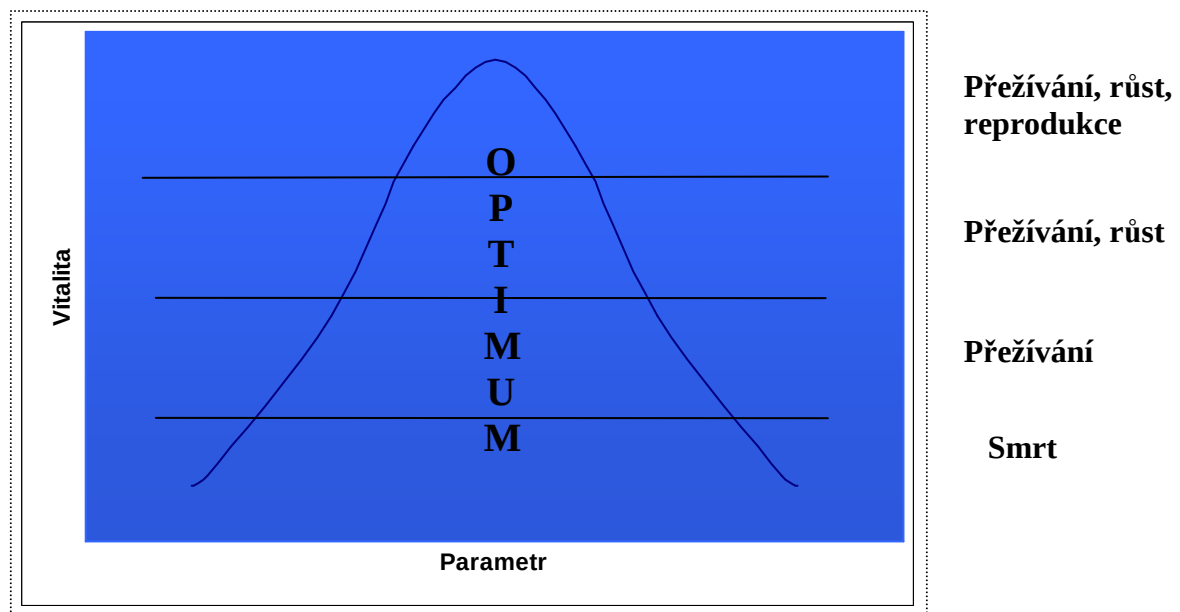
Ekosystémy mají složky živé i neživé. Živou složkou ekosystému je **společenstvo (biocenosa)**, tedy soubor všech živých organismů, které ekosystém obývají. Soubor jedinců stejného biologického druhu, kteří žijí na určitém místě (v ekosystému) v určitém čase se nazývá **populace**. Jedinec určitého biologického druhu se nazývá **organismus**. Biologický druh je soubor všech jedinců, kteří nesou stejnou (velmi podobnou) genetickou informaci a dávají při vzájemném křížení plodné potomstvo. Schopnost plodit plodné potomstvo je tradičně považována za kritérium příslušnosti ke stejnému biologickému druhu. Jedinci různých druhů (např. osel a klisna, tygr a lvice) jsou zpravidla neplodní.

Živé a neživé systémy se od sebe zásadně liší. Lze jmenovat určité typické znaky, atributy života, které charakterizují všechny živé organismy. Je to:

- **Látková výměna** - schopnost aktivně vyměňovat látky s okolím a přijímané látky metabolicky proměňovat
- **Dráždivost** - schopnost reagovat na změny prostředí, přenášet a ukládat informace o těchto změnách.
- **Reprodukce** - schopnost rozmnožování.
- **Dědičnost** - schopnost přenášet znaky (určité vlastnosti organismu) na potomstvo z generace na generaci.
- **Evoluce** - schopnost vývoje, tedy postupných změn znaků a genetické informace.
- **Homeostase** - schopnost udržovat stálé vnitřní prostředí za měnících se okolních podmínek

Homeostase

Schopnost homeostase je pro přežití kriticky důležitou součástí výbavy každého organismu. Není však neomezená. Organismus je schopný života pouze v určitém rozmezí parametrů, které je charakteristické pro daný biologický druh. Takovými parametry jsou například teplota, tlak, množství pitné vody, množství složek potravy, koncentrace kyslíku, atd. Neliší-li se parametry prostředí významně od optima, organismus přežívá a rozmnožuje se, pokud se od optima vzdalují, organismus se nejprve přestává rozmnožovat, pak přestává růst a nakonec hyne. Rozmezí parametrů, ve kterých je určitý biologický druh schopen života se nazývá **ekologická valence**. Organismy s úzkou ekologickou valencí se nazývají **stenovalentní** (stenoekní), organismy se širokou ekologickou valencí jsou euryvalentní (euryekní).



Obr. 1: Homeostase

Kromě bezprostřední schopnosti udržet stálé vnitřní prostředí (vnitřní podmínky pro život) mají organismy také schopnost **adaptace**, tedy postupného přizpůsobení se životním podmínkám. Změna podmínek vytváří evoluční tlak a adaptace na ni může po mnoha generacích vést a rozrůznění biologických druhů. Na rychle se střídajících generacích bakterií je možné sledovat, jak adaptace spolu s mutacemi a přirozeným výběrem vede k novým, odolnějším kmenům, což se projevuje například resistencí bakterií na antibiotika.

2.1 Živé a neživé složky prostředí

Mezi neživé složky prostředí - zemského ekosystému patří:

Atmosféra - vzdušný obal Země

Hydrosféra - vodstvo (moře a oceány, vodní toky a jezera, podzemní voda)

Litosféra - horninový obal

Pedosféra - půda

Část planety Země, která je obývána živými organismy se nazývá **biosféra**. I když nejbohatšími a nejrozmanitějšími částmi biosféry jsou ty na zemském povrchu v mělkých

mořích, život sahá až do hlubin Země, ke dnu oceánu a vysoko nad zemský povrch, v přízemní vrstvě atmosféry (troposféře).

2.2 Abiotické vlivy

Vlivy neživých složek ekosystému na společenstvo můžeme rozdělit na fyzikální a chemické.

2.2.1 Fyzikální vlivy

Sluneční záření je jedním z nejvýznamnějších abiotických vlivů. Je zdrojem energie pro veškeré životní pochody, která přichází ve formě světla pro fotosyntézu (viditelná oblast, vlnové délky 350 - 750 nm) a tepla (infračervená oblast, tepelné vyzařování).

Ultrafialové záření (vlnové délky 100 - 350 nm) je pro život převážně škodlivé, omezuje fotosyntézu, poškozuje zrak a u člověka vyvolává nádory na kůži, nicméně z velké části zachycováno plyny v atmosféře, z nich kriticky důležitý je stratosférický ozon (O_3), který zachycuje UV záření o vlnových délkách $\lambda < 310$ nm.

Rentgenové záření, záření γ a kosmické záření jsou záření kratších vlnových délek s vysokou energií a jsou pro život nebezpečná, svojí energií štěpí kovalentní vazby, vyvolávají tvorbu reaktivních částic, radikálů a iontů.

Teplota. Každý biologický druh potřebuje pro život určité rozmezí teplot. Organismy schopné žít v širokých rozmezích teplot se nazývají *eurythermní*, ty, které snášejí jen úzké rozmezí jsou *stenothermní* (banánovník, lední medvěd, pstruh). Některé organismy vyvinuly účinné strategie k překonávání nepříznivých teplot, jako například zimní spánek - *hibernace* nebo letní spánek - *estivace*. Rostliny často přežívají nepříznivé teploty v podobě semen, oddenků, hlíz nebo cibulek. Rozsah teplot, ve kterých na Zemi existuje život je impozantní, od -200 do 300°C . Extrémní teploty snášejí však pouze jednodušší organismy, jako bakterie, které žijí v ústí podmořských horkých pramenů.

Tlak. Suchozemské organismy jsou přizpůsobeny pouze malým výkyvům atmosférického tlaku. Život však existuje i ve hloubkách oceánů, kde je hydrostatický tlak vodního sloupce až 10 000 MPa.

Proudění vzduchu a vody. Vzduch ani voda nejsou téměř nikdy v klidu. Proudění vzduchu je nutné například pro šíření semen rostlin, pro opylování. Jde o významný fyzikální faktor, neboť některé organismy jsou uzpůsobeny pro život v silném proudu, jiným nejvíce vyhovuje klidné prostředí bez silnějších proudů.

Vlhkost vzduchu. Voda tvoří podstatnou část těl živých organismů, ve vodách praoceánu život vznikl, bez vody by v pozemské formy života nemohly existovat. Vlhkost spolu s množstvím srážek je rovněž významným fyzikálním faktorem. Společenstva vlhkomilná, obývajících deštné pralesy, se od suchomilných značně liší. Podle nároků na vodu a vlhkost můžeme rozlišovat organismy rostliny, mokřadní a suchomilné.

2.2.2 Chemické vlivy

Mezi nejvýznamnější faktory ovlivňující život společenstev patří obsah kyslíku, obsah solí ve vodě, kyselost vody a půdy obsah biogenních prvků, živin v půdě (zejména N, P, K) a přítomnost znečišťujících látek.

Obsah kyslíku ve vzduchu se významně nemění, činí asi 21 obj. %. Ve vodách ale obsah kyslíku silně kolísá. Mění se s teplotou, protože s rostoucí teplotou klesá rozpustnost kyslíku ve vodě, případně vlivem přemnožení některých vodních organismů, které pak kyslík z vody vydýchají rychleji, než se stačí doplňovat transportem ze vzduchu.

Toxické látky, které se do prostředí většinou v důsledku lidské činnosti, negativně ovlivňují reprodukci citlivých populací nebo je přímo hubí. Tyto důsledky mohou mít i vysoké koncentrace látek, které jsou jinak žádoucí, jako živiny nebo mikrobiogenní prvky.

2.3 Biotické vlivy

Organismy a populace jsou v ekosystému na sebe vzájemně závislé. Mohou být v různých vztazích, jako vztah kořisti a dravce, parazita a hostitele nebo ve vztahu symbiotickém (vzájemně výhodné spolupráce). Je-li v ekosystému třeba jen jedna populace nějakého citlivého druhu ohrožena nepříznivou změnou prostředí (např. nedostatek vláhy, chemické škodliviny), má to v důsledku vzájemné provázanosti populací ve společenstvu důsledky pro celé společenstvo daného ekosystému.

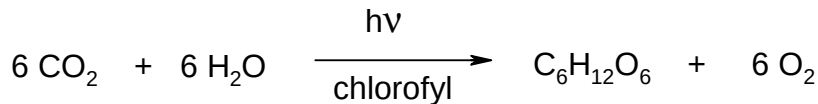
Každý organismus potřebuje k životu určitý souhrn faktorů, podmínek, za kterých může růst a rozmnožovat se. Tento soubor podmínek, který je charakteristický pro určitý biologický druh se nazývá **ekologická nika**. Tento termín je odvozen od franc. niche, což znamená výklenek ve zdi (pojem z architektury). V ekologii to ovšem neznamená pouze konkrétní místo, **stanoviště**, ale abstraktní prostor, tedy všechny ostatní podmínky jeho života, jako například typ potravy, denní či noční doba, ve které je organismus aktivní a doba ve které spí. Niky jednotlivých biologických druhů se mohou překrývat, ale jen do určité míry. Pokud jednu niku „obývají“ dva biologické druhy (překryv nik je příliš velký), po čase je jeden z nich vytlačen (například potkany a krysy). Tuto zákonitost popsal ...Gausse a nazývá se Gausseho pravidlem.

Jedno stanoviště může obývat a zpravidla obývá mnoho biologických druhů, přitom se jejich ekologické niky zpravidla významně nepřekrývají. Například populace dravců jestřába a výra mohou obývat stejný prostor, les, žít se menšími ptáky a hlodavci, přesto se jejich niky téměř nepřekrývají, protože jestřáb loví ve dne, výr v noci.

3 Výměna hmoty a energie v ekosystému - trofické úrovně

Hmota ani energie nevzniká a nezaniká. Plyne to z fundamentálních fyzikálních zákonů zachování (hmoty a energie) a z termodynamických zákonů (vět), kterými se řídí přenos energie. Při všech přeměnách energie se část této energie mění na teplo, které je jakousi nižší formou energie. Energie není „recyklovatelná“ a život na Zemi je tedy závislý na jejích zdrojích. Primárním zdrojem energie na Zemi je sluneční záření. Na zemský povrch dopadá toto záření ve formě viditelného světla (rozsah vlnových délek $\lambda = 400 - 750$ nm), ultrafialového záření ($\lambda = 310 - 400$ nm) a infračerveného („tepelného“) záření o vlnové délce (750 – 10 000 nm). Záření kratších vlnových délek je odfiltrováno atmosférou, přičemž pro odfiltrování jeho kriticky důležité části kolem 310 nm je odpovědný stratosférický ozon.

Energie slunečního světla je na Zemi proměňována na energii chemických vazeb fotosyntetizujícími organismy, tedy fytoplanktonem, řasami, sinicemi a zelenými rostlinami. Proces této přeměny se nazývá fotosyntéza a lze ho zjednodušeně vyjádřit chemickou rovnicí, při níž z oxidu uhličitého a vody vzniká glukosa a kyslík. Katalyzátorem tohoto děje je zelené barvivo chlorofyl.



Fotosyntetizující organismy jsou zdrojem živin pro veškeré další organismy na Zemi. Živí se sami (energií se slunce) a podle toho jsou nazývány **autotrofní**. Všechny ostatní živé organismy jsou **heterotrofní**, tedy odkázané na živiny vytvořené jinými. V rámci společenstva ekosystému jsou autotrofní organismy primárními **producenty**, ostatní pak **konzumenty**. Energie obsažená v chemických vazbách se v ekosystémech přenáší potravními řetězci. Lze je rozdělit do dvou hlavních typů: **Pastevně kořistnický** a **rozkladný** (detritový) řetězec.

Příklady potravních řetězců:

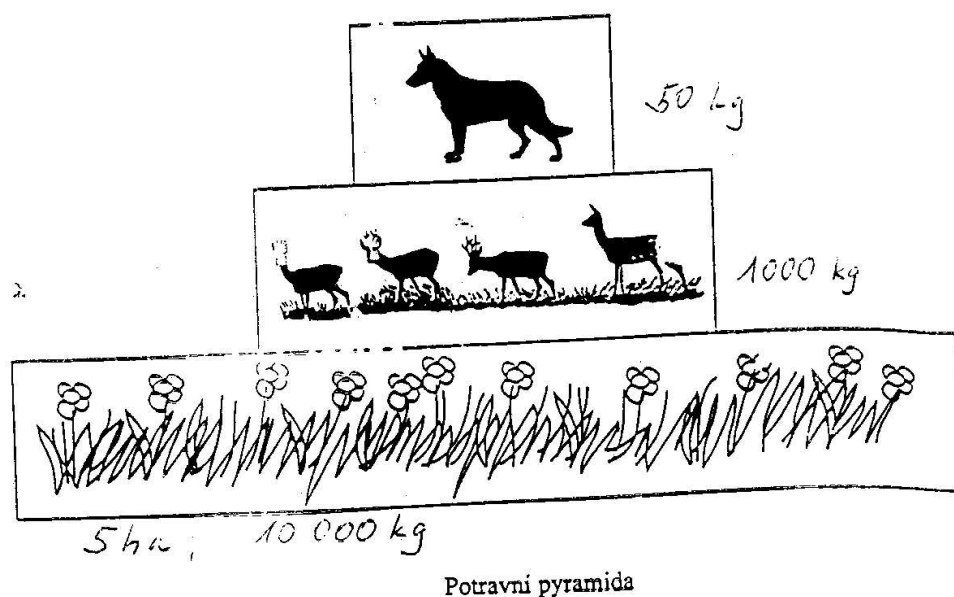
Rostliny (semena, oddenky, hlízy, plody) → býložravci (srnčí zvěř, hlodavci) → šelmy (vlky, kuna, rys)

Fytoplankton → zooplankton → ryby → dravé ryby → plazy, ptáci, savci, člověk

Opadané listí, zbytky rostlin → půdní živočichové (červy, larvy hmyzu) → ptáci (kos, drozd) → draví ptáci (káně, sokol, krahujec, sovy)

Polní plodiny (obilniny, píce) → skot, drůbež, prasata → člověk

Jednotlivé stupně potravního řetězce se nazývají **trofické úrovně**. Přenos energie mezi jednotlivými trofickými úrovněmi je ovšem málo účinný. Zelené rostliny využívají jen asi 1 % energie slunečního záření, které dopadlo na povrch jejich listů. Býložravci využívají k vytvoření svých hmotných těl jen asi 10 % energie zkonzumovaných rostlin a masožravci pak 15 – 20 % energie zkonzumovaných býložravců. Hmota tedy s rostoucí trofickou úrovní rychle ubývá, což lze znázornit trofickými pyramidami. Příklad trofické pyramidy je uveden na obrázku níže. Tato zákonitost platí i pro chov hospodářských zvířat člověkem. Plyne z ní, že rostlinná potrava je mnohem méně náročná na spotřebu přírodních zdrojů (energie a vody) než potrava živočišná. Zatímco na 1 kg chleba se spotřebuje asi 1 m³ vody, k „výrobě“ 1 kg masa je to až 10 - 20 m³.



Obr. 2.1: Potravní pyramida (převzato z knihy M. Braniš, 1999)

3 Vývoj ekosystémů, sukcese, primární produkce a respirace

Ekosystém se v čase mění, mění se způsoby přenosu a míra využití sluneční energie, produkce biomasy.

Vývoj přirozených (na rozdíl od umělých, člověkem cíleně využívaných) ekosystémů lze sledovat na obnaženém povrchu, který nebyl ovlivněn jiným společenstvem. Takových případů je poměrně málo, jsou to například nově vytvořené sopečné ostrovy nebo opuštěné haldy, výsypky povrchových dolů, které nejsou rekultivovány. Na takovém obnaženém povrchu se nejdříve usadí odolné jednodušší organismy jako řasy, lišejníky a nenáročné rostliny, jejichž semena tam byla zaváta větrem. Jsou to organismy autotrofní, pro heterotrofní organismy ještě není dostatek živin a primární produkce (P), tedy produkce živin fotosyntézou převládá nad spotřebou, tedy respirací ($R, P > R$), i když fotosyntetizující organismy samy samozřejmě také spotřebovávají živiny (a energii v nich uloženou). Když se po čase vytvoří dostatek živin, objeví se postupně organismy na dalších trofických úrovních a spotřeba živin stoupá, až se vyrovná primární produkci ($P = R$). Ekosystém tak přejde do svého **klimaxového stavu**, který je charakterizován maximální produkcí biomasy za daných podmínek. Efektivita produkce biomasy tedy dosáhla za daných půdních a klimatických podmínek svého maxima. Systém je pak v poměrně stabilním stavu dynamické rovnováhy (nikoli rovnováhy termodynamické, stav termodynamické rovnováhy je neslučitelný se životem). Dojde-li z jakýchkoli důvodů k narušení ekosystému (změnou podmínek, například přítomností škodlivin ve vodě, vzduchu či půdě), dynamická rovnováha se naruší, respirace převládá nad primární produkcí a produkce biomasy klesá, až se ekosystém ustálí v novém klimaxovém stavu, ovšem s nižší efektivitou produkce biomasy.

Tento vývoj ekosystému na novém, dřívějším společenstvem nepoznamenaném místě se nazývá **primární sukcese**. Mnohem běžnějším jevem je sekundární sukcese, tedy vývoj ekosystému na místě, kde byla odstraněna původní vegetace, ale půda s některými sporama a semeny zůstala zachována.

Člověkem účelně využívané umělé ekosystémy, obdělávaná pole, hospodářské lesy nebo rybníky, se od přirozených liší hlavně dodatečným zdrojem energie (obdělávání a hnojení půdy, čištění rybníků a vsádky ryb, výsadba stromů).

4 Biogeochemické cykly

Látky potřebné pro život v přírodě neustále kolují. S odumřelými těly organismů přecházejí do půdy a z ní se kořenovými systémy rostlin přes potravní řetězce dostávají zpět do živých těl organismů. Proudící voda vodních toků a mořských proudů i proudící vzduch přemísťují v každém okamžiku obrovská množství látek. Menší část kolujících látek se ukládá v podobě sedimentů nebo fosílií a dostává se tak mimo hlavní látkové toky.

4.1 Koloběh vody

Voda je pro život na Zemi naprosto nezbytná. Je obsažena ve všech živých buňkách a ve vodách praoceánu život vznikl. V průběhu geologického vývoje Země vodní pára, která byla v její praatmosféře, v důsledku ochlazování zemského povrchu postupně kondenzovala a tak vznikl praoceán z něhož se vyvinula dnešní hydrosféra. Ta je tvořena z 97% slanou vodou moří a oceánů a ze 3 % tzv. sladkou vodou. Z ní největší část se nachází v ledovcích (2,1 % veškeré vody). Podzemní voda tvoří asi 0,57 % a voda jezer a řek jen 0,014 %. Vodní páry v atmosféře dnes tvoří jen asi 0,001 % vodstva. Voda se neustále odpařuje z povrchu oceánu, moří, jezer a řek, pára stoupá a přitom se expanzí ochlazuje, až zkondenzuje. kapičky vody tvoří oblaky a shlukují se do větších a těžších kapek, a padají v podobě srážek na zemský povrch. Hnací silou koloběhu vody je sluneční energie. K odpaření kapalné vody je třeba dodat energii fázového přechodu, výparné teplo, při kondenzaci vody se naopak teplo uvolňuje. Koloběh vody je tedy významným termoregulačním faktorem, tlumí teplotní výkyvy a zabezpečuje relativní stabilitu klimatu. Vodní pára je významným skleníkovým plynem. S koloběhem vody se v globálním ekosystému šíří i mnohé látky ve vodě rozpuštěné, které těkají s vodní párou. Významnou skupinu takových látek tvoří vysoce chlorované organické látky, jako DDT, polychlorované bifenyly (PCB), polychlorované dibenzodioxiny (PCDD) a polychlorované dibenzofurany (PCDF). Tyto látky se v ekosystému nemohou účinně odbourávat, jsou persistentní. I když jsou sami o sobě prakticky netěkavé, s vodou tvoří azeotropní směsi a mohou se tedy zároveň s ní odpařovat (těkat) do ovzduší. Tímto způsobem se pomalu šíří v ekosystému, takže je můžeme nalézt i v polárních ledovcích.

4.1.1 Narušení koloběhu vody lidskou činností

Voda se během biogeochemického cyklu chemicky neproměňuje, a celkové toky tohoto cyklu jsou ohromné, takže nemohou být snadno narušeny lidskou činností. Člověk je však kriticky závislý na zdrojích poměrně čisté sladké vody, kterou nepotřebuje pouze k pití, ale hlavně a v největší míře k získávání potravin (pěstování kulturních plodin, chov hospodářských zvířat) a také na další účely v domácnostech, lidských sídlech a v průmyslu. V historii lidstva některé velké civilizace skončily pravděpodobně právě na nedostatek vody v důsledku regionálních změn klimatu, nebo na ztrátu úrodné půdy, dezertifikaci, v důsledku její zasolení (například Mesopotámie). V současnosti velká část lidstva trpí nedostatkem kvalitní pitné vody i vhodné vody pro zemědělské účely. Velkým problémem je zasolování vody a půdy, znečišťování povrchových i spodních vod odpady z průmyslu a zemědělství a úbytek srážek v některých částech světa, například ve středomoří. Nadměrné hnojení vede také k odplavování dusičnanů (nitrátů) a fosforečnanů (fosfátů) do vodních toků, jezer, rybníků i moří. Přebytek živin ve vodě vede k přemnožení vodních řas a sinic, které pak spotřebují ve

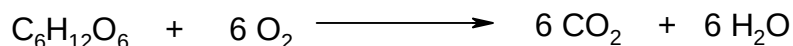
vodě rozpuštěný kyslík, načež všechny aerobní organismy, včetně řas a sinic vyhynou vodní, zbudou anaerobní organismy, takže v takové vodě převládají hnilobní procesy. Tento proces způsobenému přebytkem živin ve vodních ekosystémech se nazývá **eutrofizace**.

Na zdrojích vody je kriticky závislá produkce potravin. Odhaduje se že člověk potřebuje za rok asi 1700 m³ vody. Samozřejmě jen malou část přímo zkonzumuje v nápojích a v potravě. Hlavní část se spotřebuje na pěstování rostlin. Přitom je důležité nejen množství, ale i kvalita vody. Voda zasolená nemůže být rostlinami využita, voda kontaminovaná toxickými látkami pak nutně znamená kontaminaci potravy. Nároky jednotlivých druhů potravy na vodu se řádově liší. Na 1 kg chleba se spotřebuje asi 1 m³ vody, zatímco na 1 kg masa až 10-krát víc.

4.2 Koloběh uhlíku

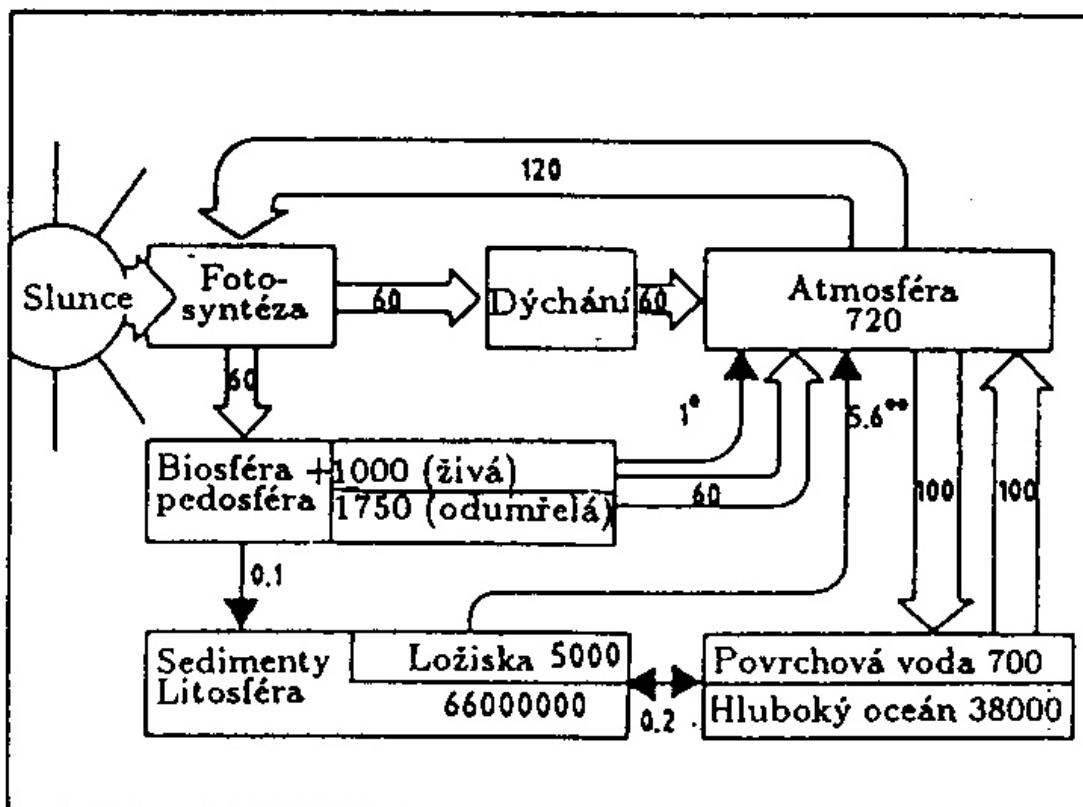
Uhlík je vedle vodíku a kyslíku jedním z hlavních biogenních prvků. V živých tělech se vyskytuje ve formě bílkovin, sacharidů i tuků, tedy všech hlavních stavebních molekul, v atmosféře ve formě oxidu uhličitého, v horninách a sedimentech ve formě uhličitánů. Atmosférický oxid uhličitý se rozpouští v povrchové vodě, takže dochází k intenzivní výměně mezi vodou a atmosférou. Rozpustnost ve vodě klesá s rostoucí teplotou a sklesajícím pH (kyselina uhličitá je nestálá, rozkládá se na oxid uhličitý a vodu). Vzdušná oxid uhličitý vstupuje do fotosyntézy a je proměňován na živiny v podobě sacharidů a na kyslík. Zelené rostliny a jiné fotosyntetizující organismy (fytoplankton) spotřebovávají samy asi polovinu těchto živin, druhou polovinu ukládají do svých těl, která pak slouží za potravu heterotrofních organismů. Jak autotrofní, tak heterotrofní organismy získávají respirací, oxidativním procesem ve kterém se živiny „spalují“ na oxid uhličitý a vodu. Při tom se uvolňuje energie, která se ukládá ve formě adenosin-trifosfátu (ATP). ATP pak slouží jako zdroj „energetické platidlo“ pro buněčné procesy vyžadující dodání energie.

Sumárně můžeme proces respirace zjednodušeně vyjádřit na příkladu monosacharidu glukosy chemickou rovnicí:



Ve skutečnosti však jde o mnohastupňový enzymy katalyzovaný biochemický proces. Jím se oxid uhličitý dostává zpět do atmosféry. Uhlík uložený v tělech živých organismů se po jejich smrti dostává do půdy, mokřadů a vody a dále přes rozkladný (detritový) potravní řetězec rovněž do atmosféry v podobě oxidu uhličitého. Chemicky jde také o respiraci, jejímiž konečnými produkty jsou oxid uhličitý a voda. Ne všechna biomasa je však takto recyklována. Pevné schránky mořských živočichů tvoří sedimenty uhličitánu vápenatého a ukládají se také ve formě korálů. Během určitých geologických období bylo v podobě biomasy uloženo obrovské množství uhlíku v mořských lagunách nebo mokřadech a postupně fosilizovalo za vzniku rašeliny, ložisek uhlí, ropy a zemního plynu. Tento proces probíhá i v současnosti, ale je velmi pomalý a odvětvuje se do něj jen malá část v biosféře kolujícího uhlíku. Mnohem rychleji jsou zásoby fosilních paliv spalovány, přičemž se do atmosféry během posledních 200 let uvolnil oxid uhličitý, který byl fixován do podoby fosilních paliv během desítek milionů let.

Významná část uhlíku tvoří methan. Ten se tvoří anaerobními rozkladnými procesy (především metabolismem anaerobních bakterií) ve vodním prostředí a ve střevech savců i jiných živočichů. Ohromná množství methanu jsou uložena v hlubokém oceánu v podobě hydrátů. Dosud však není známa uspokojivá technologie, která by umožňovala tento methan bezpečně těžit. Podobně jako oxid uhličitý je významným skleníkovým plynem.



Obr. 4.1: Koloběh uhlíku. Číselné údaje jsou pouze orientační a jsou uvedeny v 10^{12} kg. Převzato z knihy A. Heintz a G. Reinhardt, 1993.

4.2.1 Narušení koloběhu uhlíku lidskou činností

Člověk svojí činností zasahuje do oběhu spalováním fosilních paliv (rychlé vypouštění v palivech nahromaděného uhlíku do atmosféry), odlesňováním (omezování fotosyntézy) a chovem dobytka (produkce methanu). Analýzou bublinek vzduchu uložených ve vrstvách arktického ledovce, které lze s velkou přesností datovat isotopovou analýzou, bylo zjištěno, že obsah oxidu uhličitého v atmosféře za posledních asi 200 let (od začátků průmyslové revoluce) vzrostl ze 180 na dnešních 350(?) ppm. Tomuto nárůstu, spolu s nárůstem koncentrací dalších skleníkových plynů (methan, azoxid – oxid dusný), přičítají klimatologové současně probíhající změnu klimatu. O podílu lidské činnosti na změně klimatu se dosud vede spor. Analýza argumentů obou stran tohoto sporu není předmětem tohoto učebního textu.

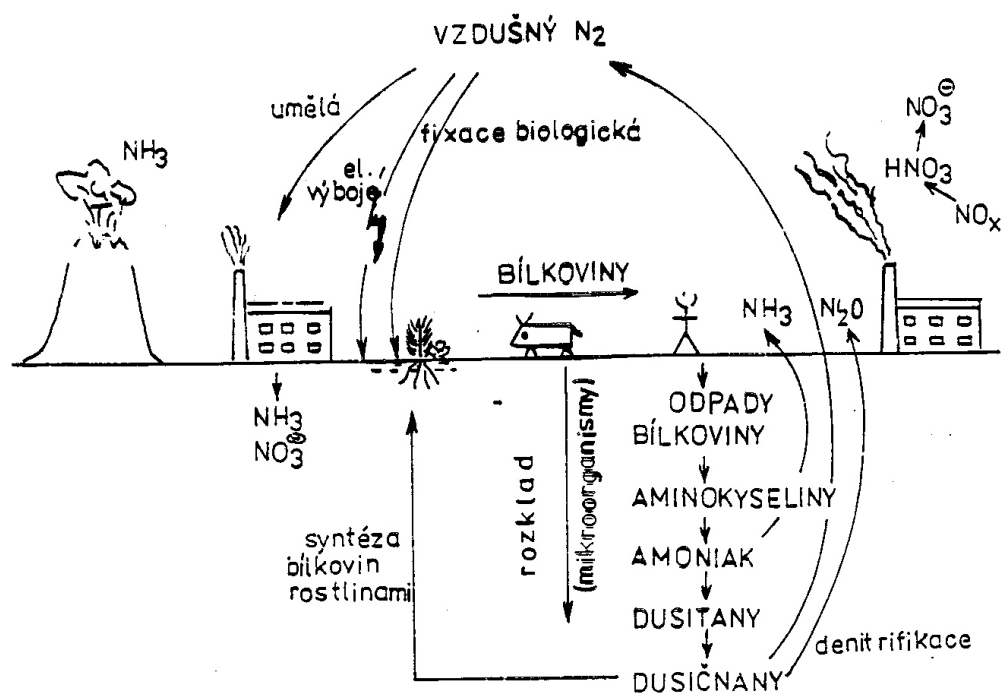
4.3 Koloběh dusíku

Dusík je důležitým biogenním prvkem, který se v přírodě nachází v mnoha chemických formách. V tělech organismů je součástí všech proteinů a nukleových kyselin, jakož i menších molekul, jako kofaktory enzymů, hormony a neurotransmitery. Plynný dusík (N_2) je hlavní složkou vzduchu (78 %). V ovzduší se nacházejí také oxidy dusíku, dusnatý a dusičitý, které vznikají při spalování nejrůznějších materiálů na vzduchu oxidací plynného dusíku při teplotách nad 500°C . V horninách se dusíkaté látky vyskytují pouze v malé míře, protože všechny soli dusičné kyseliny jsou rozpustné. Výjimkou jsou ložiska ledků, dusičnanů, které

vznikají mineralizací ptačího trusu, guána. Dusíkaté látky, zejména amoniak, se do ovzduší uvolňují při sopečných erupcích.

Dusík z atmosféry je některými půdními organismy, nitrifikačními bakteriemi, fixován oxidací až na dusičnany. Ty jsou hlavní formou dusíku, kterou mohou přijímat rostliny. Tento proces se nazývá **nitrifikace**. Tak se dusík z půdy dostává ve formě ve vodě rozpustných dusičnanů (nitrátů) do těl rostlin, kde je proměňován na stavební aminokyseliny a bílkoviny a přes býložravce a další trofické úrovně prochází potravním řetězcem. Živé organismy vylučují dusík v podobě močoviny a kyseliny močové. Odumřelá těla se dostávají do půdy nebo vody a tam podléhají rozkladným procesům. Dusík vázaný v odpadních produktech metabolismu a v odumřelých tělech rostlin a živočichů se působením mikroorganismů mění v procesu amonifikace na amoniak, který se dále oxiduje až na dusičnanový anion a tak se vrací do oběhu.

Dusičnany se kromě toho denitrifikačními bakteriemi redukuje na azoxid (N_2O) a na plyný dusík. Azoxid je jedním z významných skleníkových plynů.



Obr. 4.2: Koloběh dusíku. Převzato ze skript Palatý a Paleček, 1992.

4.3.1 Narušení koloběhu dusíku lidskou činností

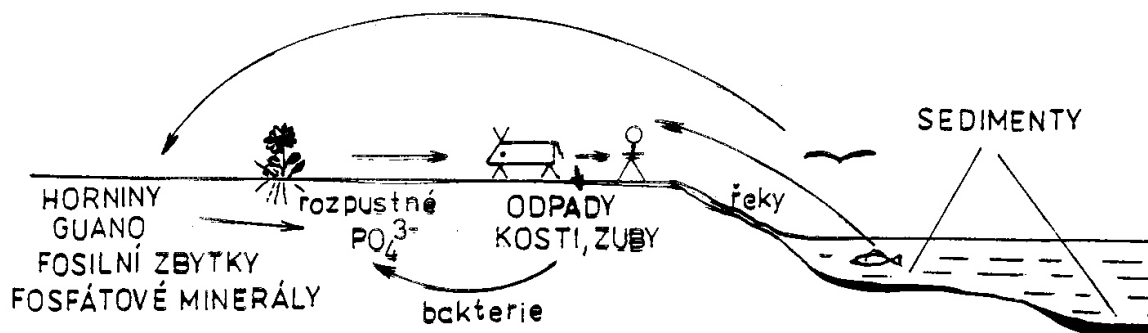
Člověk zasahuje do koloběhu dusíku především hnojením. Dusíkatá hnojiva, ať už uměle vyrobená nebo stájová, se při pěstování kulturních plodin dostávají do půdy ve větším množství, než mohou rostliny spotřebovat. Přebytkové dusíkaté látky se pak z půdy vymývají deštěm a dostávají se do vodních toků a vodních nádrží. Tam způsobují eutrofizaci, jev popsáný v odstavci 4.1.1. Eutrofizace je v současnosti významným ekologickým problémem, zasaženo je jí již i Baltské a Severní moře.

Pěstování kulturních plodin (hlavně rýže) má vliv i na globální zvýšení koncentrace azoxidu v ovzduší. Další oxidy dusíku, oxid dusnatý a dusičitý vznikají při nejrůznějších spalovacích

procesech. Hlavním zdrojem je automobilová doprava. V atmosféře se oxid dusnatý spontánně kyslíkem oxiduje na dusičitý a ten se zas působením UV záření s vlnovými délkami $\lambda < 400 \text{ nm}$ rozkládá na oxid dusný a vodu. Proto se jejich obsah obvykle stanovuje jako $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$. Reakcí s vodní párou a kyslíkem se tvoří kyselina dusičná, která přispívá ke zvýšení kyselosti srážek. Kyselé deště pak mají negativní vliv na vegetaci, hlavně na neopadavé jehličnany.

4.4 Koloběh fosforu

Fosfor je rovněž významným biogenním prvkem. Na rozdíl od uhlíku a dusíku, v přírodě se vyskytuje téměř výhradně ve formě fosforečnanů (fosfátů). V minerální formě jsou to hlavně apatit a fosforit. Tyto minerály jsou málo rozpustné, ale v kyselém prostředí se mění na rozpustnější hydrogenfosfáty. Zvětráváním hornin se fosfáty dostávají do půdy. Jsou tedy obsaženy v půdě a ve sladkých i mořských vodách. V tělech živých organismů jsou fosfáty stavební součástí kostí, dále jsou vázány v nukleových kyselinách ve fosfolipidech a některých sacharidech. Žádná ze sloučenin fosforu vyskytujících se v přírodě není těkává. Během svého koloběhu zůstává fosfor stále ve formě fosforečnanového aniontu, ať už anorganického nebo organicky vázaného. Tato skutečnost velmi zpomaluje cyklus fosforu, protože jeho přenos atmosférou je tím velmi omezen. Fosfor, který se uvolní z odumřelých těl rostlin a živočichů je postupně vyplavován vodními toky do moří, kde se usazuje ve formě nerozpustných solí (fosforečnan vápenatý). Z vody ho mohou získávat mořské řasy a fytoplankton. Odtud se potravním řetězcem dostává do těl ryb a ptáků, kteří se živí rybami. Ptačí těla a exkrementy představují jedinou cestu, kterou se fosfor dostává z hydrosféry na souš. Zdrojem fosforu pro člověka je potrava. Zvláště bohaté na fosfor je maso ryb, ale fosfor se nachází ve všech živých organismech. Rostliny jej přijímají z půdy přes ně se dostává do potravních řetězců.



Obr. 4.3: Koloběh fosforu. Převzato ze skript Palatý, Paleček, 1992.

4.4.1 Narušení koloběhu fosforu lidskou činností

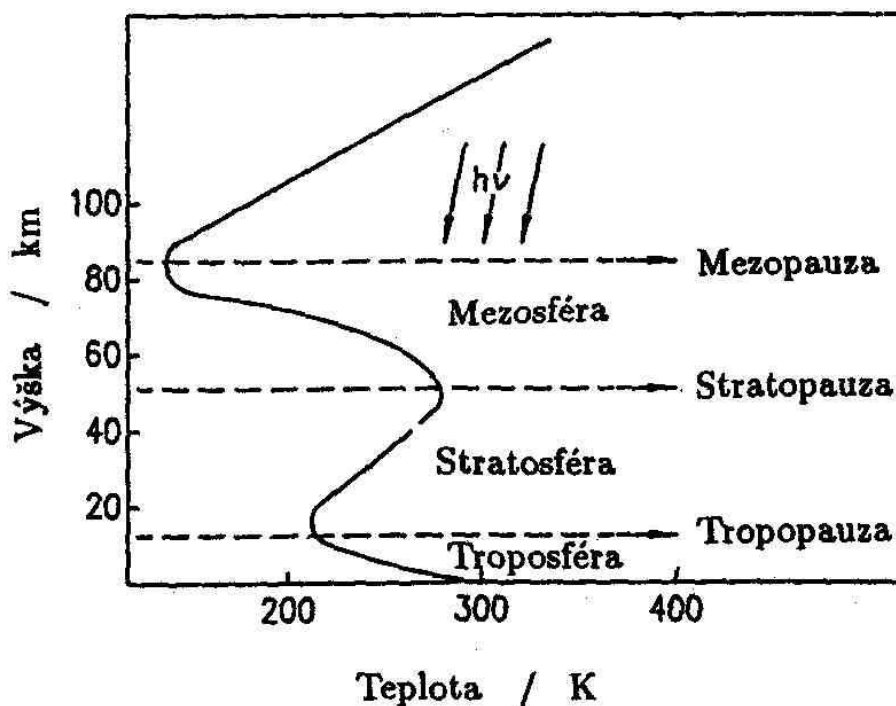
Podobně jako dusičnany, jsou i fosfáty významnými živinami pro rostliny. Při pěstování kulturních rostlin (zejména při nadměrném hnojení) se jejich přebytečná část vymývá z půdy do vodních toků a nádrží, kde může způsobit eutrofizaci. Dalším zdrojem fosfátů jsou některé odpady z průmyslu a splašky z domácností.

Fosfáty byly donedávna běžnou součástí pracích prášků a dalších saponátů jako prostředky na úpravu pH, což bylo významným zdrojem znečištění odpadních vod. V poslední době byly fosfáty nahrazeny jinými pufrujícími přísadami, které nezpůsobují eutrofizaci.

5 Atmosféra a její narušení lidskou činností

5.1 Struktura atmosféry

Vzdušný obal Země, atmosféru, lze rozdělit na 4 vrstvy. První nadzemní vrstva, **troposféra**, sahá do výšek asi 12 km (to je průměrná hodnota, ale protože atmosféra má tvar rotačního elipsoidu, nad rovníkem sahá troposféra až do výše 18 km). Tato vrstva je charakteristická tím, že s výškou nad povrchem země teplota klesá, protože se klesá hydrostatický tlak vzdušného sloupce a plyny se tedy rozpínají a ochlazují. Lehčí teplejší vzduch se nachází pod těžším chladnějším a to vede k promíchávání vrstev, protože teplý vzduch má tendenci stoupat vzhůru a chladný naopak klesat. Nad troposférou se nachází **stratosféra**. V ní se průběh teplot obrací, takže teplota s výškou nad povrchem Země stoupá. Do této vrstvy totiž proniká UV záření ze slunce, které je absorbováno ozonem (O_3) a molekulárním kyslíkem (O_2). Absorpcí UV záření se plyny ohřívají a tento efekt převládá nad ochlazováním expansí. Ve stratosféře jsou vrstvy vzduchu uspořádány stabilně a proto tam nedochází k proudění vzduchu, látky se tam šíří jen difusí, což je pomalý děj. Na rozhraní troposféry a stratosféry se nachází **tropopauza**. Tam dochází k obratu v průběhu teplot. Na okraji stratosféry, ve výšce asi 50 km se nachází **stratopauza**. Tam opět dochází k obratu teplotního průběhu a v další vrstvě, **mesosféře**, pak teplota s výškou opět klesá. Je to dáno úbytkem molekul kyslíku, které absorbují UV záření s vlnovými délkami $\lambda < 240$ nm.



Obr. 5.1: Struktura atmosféry a její teplotní profil (převzato z knihy Heinz, Reinhardt, Chemie a životní prostředí).

Opět tedy převládá vliv expanse plynu. V **mesopauze**, která se nachází ve výškách asi 90 km nad Zemí se teplotní profil opět mění, teplota začíná stoupat vlivem absorpce krátkovlnného UV záření molekulami vodní páry i dusíku. Nad mesopauzou, v **exosféře**, opět převládá efekt absorpce a ohřevu nad expansí, teplota stoupá. Struktura atmosféry a teplotní profil jsou uvedeny na Obrázku 5.1.

5.2 Skleníkový jev

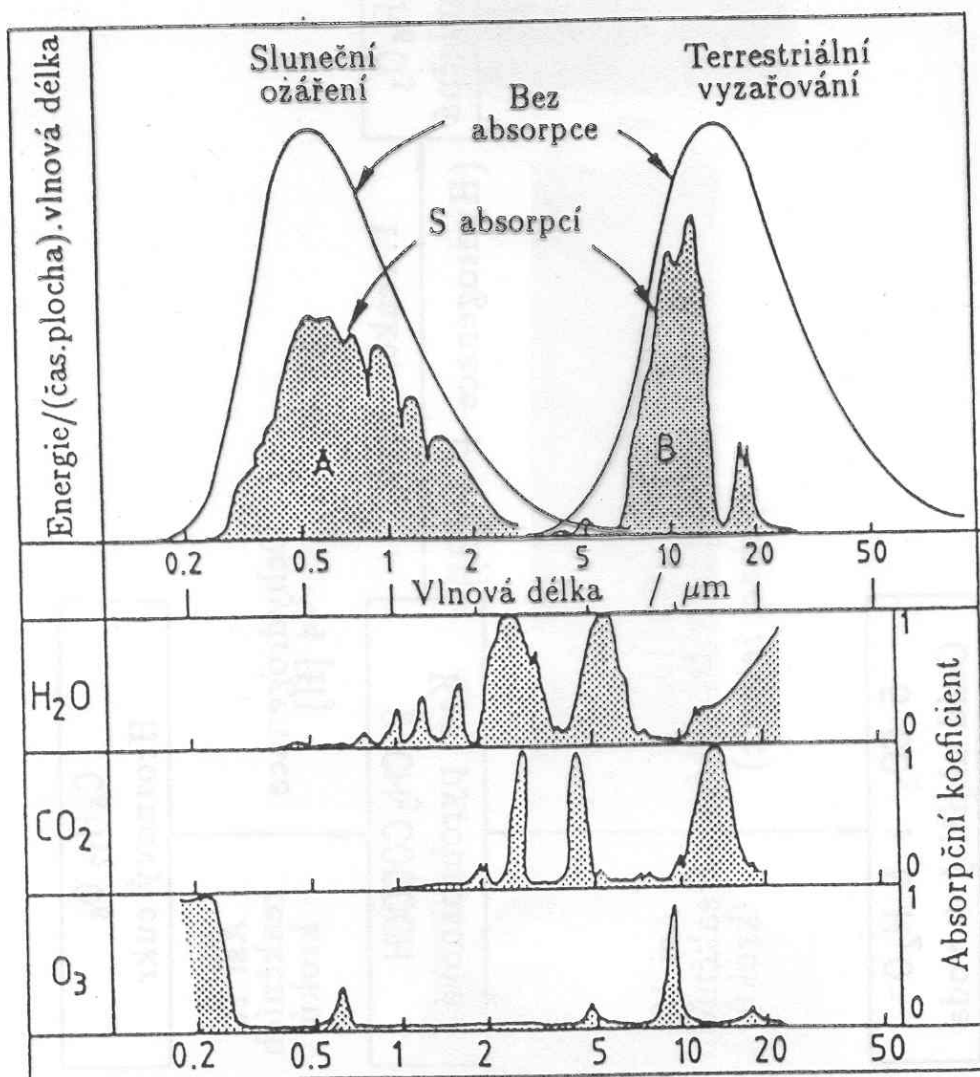
Plyny obsažené v zemské atmosféře mohou absorbovat jak na Zem dopadající tak od zemského povrchu odražené záření. Na zemský povrch dopadá záření o vlnových délkách $\lambda > 320$ nm (tedy část ultrafialového spektra (UV A) viditelné a infračervené záření a tepelné sálání). Záření s kratšími vlnovými délkami a tedy vyšší energií kvanta je zcela nebo z velké části odfiltrováno atmosférou. Dopadající záření se od zemského povrchu odráží. Část jeho energie zůstává absorbována a povrch ohřívá, část se od něj odráží. Poměr odraženého a dopadajícího záření se nazývá albedo a nabývá hodnot od 0,05 (vlhká půda) do 0,9 (sníh a led). Protože záření od povrchu odražené ztratilo absorpcí část své energie, má delší vlnovou délku než záření, které na Zem dopadlo. Proto je odražené záření (terestriální vyzařování) oproti dopadajícímu posunuto k delším vlnovým délkám, do infračervené oblasti a tepelného sálání. Některé plyny obsažené v troposféře významně absorbují v infračervené oblasti a proto absorbují více od Země odraženého záření, než záření na Zem dopadajícího (Obr. 5.1). Tyto plyny se absorbovaným zářením ohřívají a tak vlastně zadržují část terrestriálního vyzařování nad zemským povrchem. Tento jev se nazývá globální skleníkový efekt. Hlavními skleníkovými plyny jsou vodní pára, oxid uhličitý, oxid dusný, přízemní ozon a metan. Skleníkový jev je důležitým termoregulačním prvkem. Lze odhadnout, že bez něj by průměrná teplota na Zemi klesla asi o 15°C. Vodní pára se na skleníkovém jevu podílí asi 62 %, oxid uhličitý asi 22 %.

Skleníkový jev je v současnosti vášnivě velmi vyhraněně diskutován v souvislosti s globální změnou klimatu. Zastánci teorie globálního oteplování zastoupeni významnými klimatology tvrdí, že oteplování klimatu, kterého jsme v posledních desetiletích svědky přinejmenším v některých částech světa (tání ledovců), je z rozhodující části důsledkem lidské činnosti, hlavně spalování fosilních paliv spojené s vypouštěním nadměrného množství oxidu uhličitého. Fosilní paliva, která byla spalena za posledních cca 200 let, se totiž tvořila fotosyntézou během desetimilionů let.¹

Odpůrci namítají, že během geologické historie Země se klima měnilo často, někdy velmi drastickým způsobem. I v geologicky poměrně krátkém období od konce poslední doby ledové, se počasí měnilo ve vícero cyklech podle sluneční aktivity a dalších faktorů. Vliv člověka je podle odpůrců oproti přírodním vlivům zanedbatelný a snaha regulovat vypouštění skleníkových plynů škodlivá.

Smí-li autor tohoto textu jako klimatologický laik vyslovit svůj názor, zde je: Pravděpodobně se nikdy nedozvíme, jaký přesně je podíl člověka na změnách klimatu. Klimatologické modely jsou právě jen modely a nemohou kvantifikovat všechny skutečně významné faktory, které tvoří zemské klima, postihnout všechny aspekty klimatu. Změnu klimatu během svého již dost dlouhého života však zřetelně pociťuji (i když to nemohu doložit tvrdými daty). Domnívám se, že lidstvo dosáhlo již pouhou svou početností a využíváním neobnovitelných zdrojů hranic, kdy vážně ohrožuje přírodní prostředí, na kterém je bytostně závislé, i když to díky

¹ Analýzou vzduchových bublinek v datovatelných vrstvách polárního ledovce bylo zjištěno, že koncentrace CO₂ v atmosféře v době předindustriální byla asi 280 ppm (do konce 18. století), zatímco dnes je to 400 ppm. Z toho ovšem přímo ještě nevyplývá, že právě tento nárůst je odpovědný za oteplování klimatu.



Obr. 5.1: Srovnání na Zem dopadajícího a od Země odraženého záření. Absorpční spektra tří hlavních skleníkových plynů. Podle Heintz a Reinhardt, 1993.

civilizačním vymoženostem bezprostředně nemusíme pociťovat (pocítíme to, až bude na řešení pozdě). Proto je třeba naléhavě hledat možnosti úspor neobnovitelných zdrojů, včetně zdrojů energie. Je to neobyčejně těžké v ekonomickém systému, který je "odsouzen k růstu". Soustředění se na snižování emisí oxidu uhličitého je příliš jednostranné, málo efektivní, zkrátka, pravděpodobně poněkud pomýlené. Avšak směřuje-li snaha omezit tyto emise k omezení spotřeby fosilních paliv, je to směr v zásadě správný. Jen by měl být rozšířen na omezení spotřeby energie a přírodních zdrojů celkově a to je v dnešním světě bohužel velmi nepopulární.

5.2.1 Zdroje skleníkových plynů

Kvantitativně nejvýznamnějším skleníkovým plynem je vodní pára. Tvoří se odpařováním z vodních hladin a je součástí termoregulace. Vodní pára vzniklá spalováním organických materiálů tvoří jen relativně malý příspěvek k ohromnému toku koloběhu vody.

Oxid uhličitý se do atmosféry dostává jednak z litosféry při sopečných erupcích a pomalém odplynění uhlikatých minerálů na povrchu a těsně pod povrchem Země a jednak z biosféry,

jako produkt respirace rostlin i živočichů. Odplynění litosféry včetně sopečných erupcí produkuje ročně odhadem 65 - 319 milionů tun CO₂ ([Moerner a Etiope, 2002](#)). Spalováním fosilních paliv se do atmosféry ročně uvolní asi 30 miliard tun CO₂ ([EIA 2011](#)).

Přízemní ozon se tvoří jednak při elektrických výbojích a jednak sekundárními fotochemickými přeměnami výfukových plynů (letní smog). Na rozdíl od stratosférického ozonu, jehož množství globálně ubývá, koncentrace ozonu v troposféře značně kolísají a mají tendenci se zvyšovat.

Oxid dusný vzniká působením denitrifikačních bakterií, antropogenním zdrojem je pěstování kulturních plodin, zejména rýže.

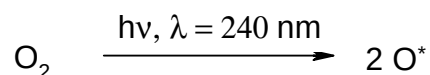
Methan je produktem metabolismu anaerobních bakterií, vzniká při vyhnívání organických materiálů, dále působením střevních bakterií. Antropogenními zdroji jsou chov dobytka a pěstování některých plodin.

Mezi další skleníkové plyny patří fluorované a chlorované uhlovodíky, například tetrachlormethan. I když jejich "skleníkový potenciál" je vysoký (dlouhá doba setrvání v atmosféře, silná absorpce terestriálního vyzařování), koncentrace v atmosféře jsou velmi nízké, příspěvek ke skleníkovému efektu malý, pravděpodobně nevýznamný.²

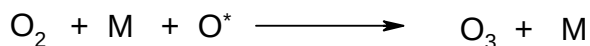
5.3 Ozonová vrstva a její narušení

5.3.1 Tvorba a rozklad stratosférického ozonu

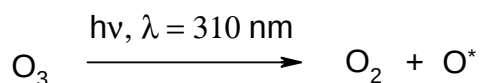
Ozon se tvoří ve stratosféře vlivem krátkovlnného UV záření $\lambda < 240$ nm. Molekuly kyslíku toto záření absorbují a rozpadají se na dva excitované atomy kyslíku.



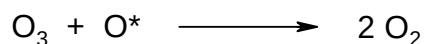
Excitovaný atom kyslíku se srazí s molekulou kyslíku za vzniku ozonu. Tento děj je ve skutečnosti trimolekulární, takže vyžaduje srážku tří částic, kde třetí může být další molekula kyslíku, dusík nebo vodní pára.



Molekuly ozonu absorbují v oblasti $\lambda < 310$ nm, přičemž se rozpadají.



Když se excitovaný atom kyslíku srazí s molekulou ozonu, vzniknou dvě molekuly kyslíku.



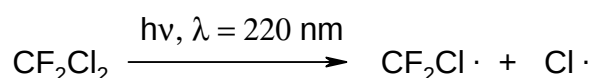
Tyto dva děje, tvorba a zánik ozonu jsou v dynamické (nikoli termodynamické) rovnováze. Ozonová vrstva je tedy difusně rozptýlena ve stratosféře, kdyby všechen stratosférický ozon byl stlačen na normální atmosférický tlak, tvořil by vrstvu o síle několika milimetrů. Tato "vrstva" chrání život na Zemi před jinak zhoubným krátkovlnným ultrafialovým zářením (UV A a UV B).

² Některé z těchto látek však významně poškozují ozonovou vrstvu ve stratosféře.

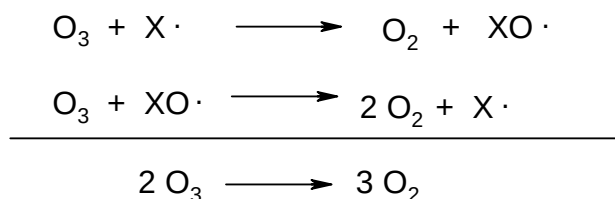
5.3.2 Freony a poškození ozonové vrstvy

Chlorfluoruhlovodíky, Freony našly rozsáhlé použití jako média v chladicích zařízeních, jako hnací plyny aerosolů, hasiva, a jako rozpouštědla a čisticí prostředky. Již v 70-tých letech 20. století se však ukázalo, že tyto látky, odbourávají stratosférický ozon. Jejich použití bylo v r. 1987 omezeno Montrealským protokolem.

Freony jsou chemicky poměrně velmi inertní, proto mají dlouhou dobu setrvání v atmosféře (až 100 let). Od místa použití se rychle šíří troposférou, protože v troposféře je vzduch promícháván konvekci. Poté pomalu pronikají přes tropopauzu do stratosféry, kde jen pomalu difundují do vyšších výšek, protože ve stratosféře vzduch prakticky neproudí (teplota stoupá s výškou nad povrchem). Tak se dostanou do vrstev atmosféry, kam proniká krátkovlnné UV záření. Vazby C-Cl v těchto uhlovodících toto záření absorbují a štěpí se na volné radikály. Například difluordichlormethan (Freon 12) se štěpí takto:



Fotochemicky generované radikály (v uvedeném případě $\text{CF}_2\text{Cl}\cdot$ a $\text{Cl}\cdot$) pak reagují s ozonem následujícím způsobem.



Jde o řetězovou radikálovou reakci, jejímž výsledkem je rozpad ozonu na bimolekulární kyslík. Jeden radikál $\text{X}\cdot$, který se v řetězci reakcí neustále obnovuje, jak může rozložit až desetitisíce molekul ozonu, než rekombinací zanikne (při srážce s jiným radikálem).

Ve snaze najít neškodné náhrady za Freony byly nejprve vyvinuty tzv. měkké Freony. Jsou to rovněž fluorchloruhlovodíky, ale neúplně halogenované, takže obsahují v molekule vodík (například difluorchlormethan, CHF_2Cl). Tyto látky sice také mohou ve stratosféře generovat volné radikály, ale jsou mnohem méně stabilní, takže jejich doba setrvání v atmosféře je mnohem kratší a účinek slabší. Novější alternativou jsou fluorované uhlovodíky, které nemají v molekule jiný halogen. Tyto látky neabsorbují v UV oblasti a nemohou tak ve stratosféře generovat volné radikály. Jejich výroba je však nákladná.

Zdrojem volných radikálů ve stratosféře nejsou však jen Freony, ale i některé další stopové plyny, jako oxidy dusíku - N_2O , NO a NO_2 (oxid dusnatý a dusičitý jsou v základním stavu radikály) a chlorované uhlovodíky (např. tetrachlormethan).

5.4 Znečišťující látky v atmosféře, emise a imise

V zimě roku 1952 zasáhl Londýn velký smog. V té době se v Londýně topilo převážně hnědým uhlím s velkým obsahem síry, takže za chladného inverzního počasí, když se hodně topilo, spaliny, vytvořily hustou šedivou mlhu. Slabá viditelnost ochromila dopravu, štiplavý dým pronikal až do domácností. Na následky této smogové kalamity předčasně umřelo asi 4000 lidí. Od té doby se podobným typům smogu říká londýnský nebo zimní smog. Vzniká ve velkých městech v zimě za inverzního počasí, když se za bezmračných nocí povrch Země

prudce ochladí a u něj se drží vrstva studeného vzduchu. Teplotní profil těsně nad povrchem Země je tedy obrácený. Teplota s výškou stoupá a vzduch potom neproudí, takže škodliviny se šíří pouze difusí a to je děj velmi pomalý. Inverse ale není příčinou smogové situace, tím je vypouštění nečistot do prostředí, emise škodlivých látek. Londýnský smog je tvořen oxidem siřičitým, oxidy dusíku (NO_x), polétavým prachem, částicemi sazí. Na površích sazí jsou adsorbovány toxické organické látky vznikající nedokonalým spalováním, jako polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH = polycyclic aromatic hydrocarbons), například karcinogenní benzo[a]pyren nebo nitrobenzanthrony. Oxid siřičitý vzniklý spálením síry obsažené v uhlí je ve vzduchu dále oxidován na oxid siřový, který s vodou dává kyselinu sírovou. Podobně oxidativní reakcí oxidů dusíku s vodou vzniká kyselina dusičná. Tyto dvě silné minerální kyseliny jsou hlavní příčinou kyselých srážek, které poškozují vegetaci. Látky vypouštěné z různých zdrojů, jako komíny topenišť či spalovny a výfuky automobilů (**emise**), se tedy v atmosféře šíří, přenášejí z místa na místo (**transmise**). Z emisí, které prošly chemickými přeměnami v atmosféře a částečně se rozptýlily v prostředí, se stávají **imise**.

V Londýně se akutní problém velkého smogu podařilo vyřešit přechodem topení na zemní plyn. Avšak kvůli neustále se zvyšující automobilové dopravě zažívá Londýn, stejně jako většina světových metropolí, smogové kalamity prakticky každý rok.

Jiný typ smogu se v hustě osídlených a dopravou přetížených oblastech vyskytuje v létě. Je sice tvořen podobnými emisemi, hlavně oxidy dusíku, mechanickými částicemi a produkty nedokonalého spalování (saze, těkavé uhlovodíky, aldehydy, PAH), ale tyto látky za letního počasí podléhají v atmosféře fotochemickým přeměnám, tvoří se volné radikály, ozon, a produkty oxidace původních znečišťujících látek. Charakteristickou škodlivinou vzniklou při těchto oxidativních procesech je peroxyacetyl-nitrát vzorce $\text{CH}_3\text{CO}-\text{OO}-\text{NO}_2$ (PAN).

Nejmarkantnějším účinkem smogu (zimního i letního) na lidské zdraví jsou projevy poškození dýchacích cest, chronické bronchitidy, další respirační onemocnění, poruchy imunitního systému. Vzhledem k prokazatelné přítomnosti silně karcinogenních látek je pravděpodobný i vliv na zvýšení výskytu nádorových onemocnění v populaci.

6 Výroba energie a životní prostředí

Moderní člověk se stal závislým na výrobě energie a její spotřeba stále roste. Za posledních 20 let vzrostla celosvětová výroba energie o více než 40 %. Přesto na Zemi zůstává asi 1,2 miliardy lidí bez přístupu k vyráběné energii. Asi 82 % energie se dosud vyrábí z fosilních paliv a přes rostoucí výrobu energie z nových alternativních zdrojů se podíl fosilních paliv za uplynulých 20 let nezměnil. Do roku 2020 se očekává mírný pokles tohoto podílu na 76% [World Energy Council, 2013](#). Spalování fosilních paliv je přitom hlavním zdrojem emisí oxidu uhličitého a v rámci snahy o zmírnění globálního oteplování je ze strany vládních i nevládních organizací dlouhodobý tlak na omezení těchto emisí. Nicméně jejich růst se nepodařilo zastavit.

V r. 2011 činila primární světová výroba energie asi 14.10 toe^3 , světová populace asi 7 miliard. Na hlavu tedy připadá 2 toe energie za rok, což představuje za rok asi 84.10^9 J (1 toe = 41,868 GJ), což je za den asi 230 kJ. Vlastními silami (činností svalů) může člověk za den vykonat práci asi 2,7 kJ. Za den tedy průměrný obyvatel planety spotřebuje asi 85-krát více energie, než je schopen sám vynaložit ($230/2,7 \approx 85$). Jakoby na něj nepřetržitě pracovalo 85 "energetických otroků". V roce 2005, kdy činila světová spotřeba energie 11,3 toe pracovalo na každého z 6,5 miliardy obyvatel planety v průměru 70 „energetických otroků“.

³ toe = "tonne of oil equivalent" tedy množství energie odpovídající 1 t ropy

Za 6 let tedy celková spotřeba energie narostla o 24 % a spotřeba na hlavu o 21 %.

6.1 Zdroje energie

Zdroje energie se tradičně dělí na **obnovitelné** a **neobnovitelné**. Zdroje, jejichž zásoby lze průběžně obnovovat rychlostí srovnatelnou nebo vyšší než rychlost jejich spotřeby, jsou považovány za obnovitelné. Neobnovitelné zdroje energie jsou pak takové, jejichž rychlost spotřeby značně překračuje rychlost obnovování. Nemusí tedy být neobnovitelné v absolutním smyslu.

6.1.1 Neobnovitelné zdroje energie

Mezi neobnovitelné zdroje energie patří fosilní paliva (uhlí, ropa, zemní plyn, rašelina) a jaderná paliva (uran). I když fosilní paliva se tvoří přeměnou odumřelých těl rostlin a živočichů i v současnosti, jejich zásoby vznikaly během stamilionů let a rychlost spotřeby zjevně vysoce překračuje rychlost jejich obnovy.

6.1.2 Obnovitelné zdroje energie

Hlavním primárním zdrojem energie na Zemi je slunce. Sluneční energie má původ v termojaderné reakci, která je sice v principu vyčerpateľná (nebude probíhat věčně), ale z hlediska lidské historie je její trvání prakticky nekonečně dlouhé. Sluneční energii lze využívat přímo k ohřevu pomocí slunečních kolektorů nebo po přeměně na elektrickou energii ve fotovoltaických článcích, větrných nebo vodních elektrárnách. Fotosyntézou se sluneční energie mění na energii chemických vazeb v zelených rostlinách a dalších fotosyntetizujících organismech. Odumřelá těla rostlin, biomasa, pak mohou sloužit jako významný obnovitelný zdroj energie, kterou lze uvolnit jednoduše spalováním a další přeměnou získaného tepla na elektrickou energii. Před spalováním lze surovou biomasu chemicky zušlechtit přeměnou na kapalná nebo plynná paliva (tzv. biopaliva a bioplyn).

Zvláštním případem mezi obnovitelnými zdroji je geotermální energie. Jde o tepelnou energii zemského jádra pocházející z gravitace a z přirozených radioaktivních procesů v zemském jádře a v zemské kůře. Projevem této energie jsou sopečné erupce a gejzíry. I když se v celku řadí mezi obnovitelné zdroje, některé zdroje geotermální energie jsou vyčerpateľné v průběhu desítek let.

Výčet obnovitelných zdrojů energie:

Solární energie (přímé využití, sluneční kolektory, nepřímé, fotovoltaické články)

Energie proudící vody (vodní elektrárny - přehrady, přílivové elektrárny; koloběh vody je poháněn energií ze slunce)

Energie větru (větrné elektrárny; pohyb vzdušných mas; vítr je rovněž hnán sluneční energií)

Biomasa (spalování přímé nebo po přeměně na ethanol, bionaftu či bioplyn, palivo pro tepelné elektrárny; zdrojem biomasy je fotosyntéza, tedy opět sluneční energie)

Geotermální energie (horké prameny, geotermální elektrárny)

Mezi obnovitelné zdroje energie bývá často chybně řazen také vodík. Nejde však o zdroj energie, nýbrž o médium vhodné k jejímu přenosu. Vodík totiž neroste na stromech, je nutno jej vyrobit. Na jeho výrobu je pak nutno vynaložit energii, která vždy převyšuje energii získatelnou jeho spálením. Jako palivo má vodík oproti fosilním palivům určité výhody. Při jeho spalování vzniká pouze vodní pára, žádný oxid uhličitý, uhelnatý, saze, ani nespálené

zbytky uhlovodíků. Negativní dopady na životní prostředí spojené se získáváním energie se tak jen přesouvají z místa užití na místo výroby. Jeho využívání však může řešit některé aktuální ekologické problémy, zejména znečištění ovzduší velkých měst smogem.

6.2 Výhody a nevýhody jednotlivých zdrojů energie

6.2.1 Fosilní paliva

Z fosilních zdrojů pochází dnes asi 80 % vyráběné energie. Přes veškerou snahu nahradit je obnovitelnými zdroji jejich podíl výrazně neklesá. Jejich zjevnou výhodou je totiž vydatnost, tedy velký obsah získatelné energie vztažené na jednotku hmotnosti nebo objemu a poměrně snadný způsob získávání energie. Nevýhodou je zátěž životního prostředí spaliny. Při spalování všech fosilních paliv vzniká oxid uhličitý.

Při spalování uhlí se ve spalinách nachází pestrá směs kontaminantů životního prostředí. Jsou to oxid siřičitý, oxid dusnatý a dusičitý⁴, oxid uhelnatý, saze, polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH) a popílek, který obsahuje těžké kovy jako olovo a arsen. Obsah kontaminantů ve spalinách silně závisí na kvalitě uhlí a na způsobu spalování. Například černé uhlí obsahuje méně než 1 % síry, hnědé uhlí obsahuje 3 – 5 % síry. Při spalování se síra promění na oxid siřičitý. Oxidy dusíku jsou produkty oxidace vzdušného dusíku při teplotách hoření. Provázejí tedy veškeré spalovací procesy na vzduchu. Oxid uhelnatý, saze a PAH jsou produkty nedokonalého spalování, jejich tvorbu lze potlačit přebytkem vzduchu. Z uvedeného je zřejmé, že spalováním uhlí v tepelných elektrárnách vzniká velké množství toxických polutantů. Dnešní tepelné elektrárny spalující uhlí jsou proto vybaveny výkonnými technologiemi na odstraňování škodlivin z kouřových plynů. Tyto čistící procesy však vyžadují energii a tedy snižují energetickou účinnost tepelných elektráren.

Nejvýznamnějším fosilním zdrojem energie je v současnosti ropa. Lze ji poměrně snadno přepravovat a zpracovat na různé druhy paliv určených pro dopravu, vytápění i výrobu energie. Při spalování ropných frakcí se do vzduchu uvolňuje oxid uhličitý, oxid uhelnatý, oxidy dusíku (NO_x), nespálené zbytky uhlovodíků, saze na nichž jsou adsorbovány PAH a jejich nitro-deriváty. To se projevuje hlavně v místech s intenzivní dopravou (viz. Oddíl 5.4). Ropa je strategickou surovinou, která měla jako vydatný zdroj energie klíčový význam pro rychlý technický rozvoj během celého 20-tého století. Je také fosilním palivem, u kterého je hrozba vyčerpání dostupných světových zásob nejaktuálnější. Klasická ropná ložiska jsou postupně vyčerpávána a nahrazována těžbou ropných písků, která je však mnohem náročnější nejen ekonomicky, ale také na energii nutnou k jejich těžbě a zpracování (Cílek a Kašík, 2007).

Zemní plyn nabývá v poslední době na významu. Tradičně byl používán hlavně k vytápění v průmyslu i domácnostech, ale v poslední době částečně nahrazuje ropná paliva i v dopravě a to ve formě stlačeného nebo zkapalněného plynu (compressed/liquified natural gas, CNG/LNG). Jeho přeprava je náročnější než v případě uhlí a ropných paliv. Přepravuje se plynovody, případně v poslední době i ve zkapalněné formě. Jeho výhodou jsou poměrně čisté spaliny (oxid uhličitý a voda), nevýhodou je zvýšené riziko exploze při přepravě a při náhodných únicích. Hlavní složkou zemního plynu je methan, významný skleníkový plyn.

6.2.2 Jaderná energie

Jde o energii, kterou jsou poutány k sobě částice v atomovém jádře. Současné znalosti umožňují uvolnit ji neřízeně při výbuchu atomové či vodíkové bomby nebo řízeně, při štěpné

⁴ Koncentrace těchto plynů se obvykle vyjadřují souhrnně jako NO_x = NO + NO₂. Ve vzduchu se totiž oxid dusnatý spontánně oxiduje na dusičitý a dusičitý se fotochemicky rozkládá vlivem záření o vlnové délce 400 nm podle rovnice NO₂ → NO + ½ O₂.

reakci v jaderném reaktoru. Štěpná reakce je dosud jediným způsobem, kterým lze z energie jádra získat elektrickou energii. Jako palivo se používá uran obohacený o izotop ^{235}U nebo plutonia ^{239}Pu . Výhodou jaderné energie je vysoký energetický obsah na jednotku hmoty. Z 1 kg paliva lze v jaderném reaktoru získat asi 1 GWh energie ve formě tepla, což při účinnosti přeměny na elektrickou energii 33 % činí 330 MWh. Přitom 1 kg ^{235}U představuje objem jen asi 5 ml. Při výrobě energie v jaderné elektrárně se netvoří emise oxidu uhličitého, ale odpadá značné množství tepla, které lze částečně využít například k dálkovému vytápění. S výrobou jaderné energie jsou spojeny 2 hlavní problémy: bezpečnost a radioaktivní odpad. I když moderní jaderné elektrárny mají sofistikované zabezpečovací systémy, riziko havárie nelze nikdy zcela vyloučit. To ostatně platí pro všechna rizika, ale nehoda v jaderné elektrárně, i když je málo pravděpodobná, má potenciál způsobit ohromné škody. Dosud bylo na celém světě zaznamenáno 99 nehod v jaderných elektrárnách. Nejzávažnější jadernou havárií posledních let byla havárie elektrárny v japonské Fukušimě, ke které došlo v důsledku zemětřesení a vlny tsunami. Jaderné elektrárny se mohou stát také atraktivním cílem teroristických útoků. Stále se zvyšující požadavky na bezpečnost jaderných elektráren pochopitelně zvyšují jejich pořizovací i provozní náklady. Po štěpné reakci zůstává ve vyhořelém palivu ještě značná část energie, která se postupně uvolňuje v podobě radioaktivního záření a tepla. Vyhořelé palivo je silně radioaktivní a uvolňuje velké množství tepla, takže se musí izolovat od okolí a chladit ve vodních nádržích po dobu nejméně 1 roku. Poté se může přenést do nechlazeného meziskladu vyhořelého paliva. Obsahuje až 96 % uranu, který lze aspoň z části recyklovat. Recyklace se ale dosud v komerčním měřítku neprovádí. Naděje na lepší využití jaderného paliva a tím dlouhodobější udržitelnost jaderné energetiky představují rychlé množivé reaktory, případně jiné nové technologie. Významným omezením provozu jaderných elektráren se stává v době letního sucha nedostatek vody k chlazení reaktoru. Ve Francii musely být v období sucha některé bloky odstaveny.

6.2.3 Solární energie

Na zemský povrch dopadá obrovské množství energie ze slunce v podobě viditelného, ultrafialového a infračerveného záření. Tato energie je však rozptýlena (má poměrně malou hustotu a její tok je nerovnoměrný (střídání dne a noci, závislost na zeměpisné šířce a na počasí). Odhaduje se, že pouhé 0,02 % dopadající energie by stačilo pokrýt spotřebu lidstva. Reálný potenciál solární energie je podle odhadu UN Development Programme asi 400-krát větší než globální spotřeba energie. Efektivní využití tohoto potenciálu ale naráží na vážné překážky. Především je to zmíněná nerovnoměrnost toku, závislost na počasí a z toho vyplývající problémy stabilní produkce elektřiny, nákladnost i energetická náročnost výroby fotovoltaických článků. Problém nerovnoměrného toku energie by se potenciálně dal vyřešit účinným skladováním energie, avšak ukládání většího množství energie, akumulace nebyla dosud uspokojivě vyřešena. Dostupné akumulátory jsou drahé, jejich výroba je náročná na přírodní zdroje a představuje ekologickou zátěž. Stabilní rozvodná síť vyžaduje velkokapacitní a relativně stálé zdroje energie. Při velkém podílu energie ze zdrojů podléhajících výkyvům se i tzv. chytrá síť stává nestabilní a hrozí kolaps. Nicméně solární energie má již dnes mnohostranné využití. Nejde zdaleka jen o fotovoltaické články, které dodávají elektřinu do sítě. Solární energie se používá k ohřevu a desinfekci vody či k výrobě vodíku jako média na přenos energie. Ve vývoji jsou i různé druhy solárních

automobilů a letadel, a umělá fotosyntéza. Solární energie má mnohostranné využití a její potenciál ještě zdaleka nebyl využit.⁵

6.2.4 Vodní elektrárny

Z vodních elektráren pochází asi 16 % světové produkce elektrické energie a asi 2 – 3 % celkové spotřebované energie. Jde tedy o velmi významný zdroj. Většina této energie je vyrobena ve velkých vodních elektrárnách u přehrad. Výhodou hydroelektráren je vysoká energetická účinnost, žádné emise spojené s provozem (Ty jsou však spojeny s výstavbou, údržbou a likvidací vodních děl). Přehrady mohou za příznivých okolností regulovat průtok vody pod nimi a do jisté míry chránit před záplavami. Nevýhodou je u velkých vodních děl významný zásah do ekosystémů, změna lokálního klimatu. Odvedení vody z velkého území a odpar z vodní plochy, který je u přehrad mnohem větší než u vodních toků, může vést k vysušování území kolem vodního díla. Malé vodní turbíny instalované na vodních tocích jsou ekologicky velmi šetrné, jedinou nevýhodou je jejich malý výkon.

6.2.5 Biomasa

Asi 1% na zemský povrch dopadajícího slunečního záření je využito fotosyntetizujícími organismy a zafixováno v podobě energie chemických vazeb. Ta se v přírodě uvolňuje rozkladnými procesy, hlavně respirací. Tím získávají živé organismy energii potřebnou na udržování životních funkcí, růst a rozmnožování. Tuto energii lze proměnit na teplo a v dalších krocích i na jiné druhy energie také spálením organické hmoty odumřelých těl rostlin – biomasy. Tradičně se k tomuto účelu používalo a používá dřevo. Po vysušení je dřevo kvalitním palivem s vysokým obsahem uhlíku na jednotku hmotnosti i objemu a tedy s poměrně vysokou výhřevností (i když mnohem nižší než fosilní paliva). Dnešní využití biomasy není omezeno jen na dřevo, lze zužitkovat rostliny zvláště pěstované pro energetické účely i zbytky rostlin z pěstování ostatních zemědělských plodin. Přímé spalování biomasy je (s výjimkou dřeva) snad nejméně vhodným způsobem jejího využití, ale v omezené míře je používáno (například přidávání slámy k uhlí v tepelných elektrárnách). Mnohem pokročilejším způsobem je přeměna biomasy na plynná a kapalná paliva. Z nich nejběžnější je ethanol, který se pro energetické účely vyrábí z cukrové řepy, cukrové třtiny nebo z obilí. Z řepky olejné, případně v jiných oblastech i z jiných olejnin se vyrábí tzv. bionafta. Jde o chemicky upravený olej. Triglyceridy oleje se hydrolyticky štěpí a vniklá směs mastných kyselin se pak převede na methylestery. Bionafta je tedy směsí methylesterů mastných kyselin. Uvedená paliva mohou aspoň z části nahradit paliva fosilní. Podmínkou ovšem je, aby jejich spálením bylo možno získat více energie, než bylo vynaloženo na jejich získání. Tato podmínka není u dnes vyráběných biopaliv vždy splněna. Na 1 litr bionafty z řepkového oleje je v našich podmínkách nutno vynaložit energii odpovídající zhruba 1 litru motorové nafty z ropy. Energetická návratnost $EROI \cong 1$ (viz. níže).

6.3 Energetická návratnost

Energii nelze získat bez vynaložení energie. Ta je potřebná k těžbě nebo pěstování energetických surovin, při stavbě a provozu elektráren, dopravě materiálu a k některým

⁵ Fotovoltaická energetika a pro lidi s malou rozlišovací schopností i solární energie vůbec se u nás netěší dobré pověsti. Je to vinou špatného politického rozhodnutí spočívajícího v nepřiměřené podpoře investic do fotovoltaických elektráren, zejména dlouhodobé garance vysokých výkupních cen. Je těžké uvěřit, že takové rozhodnutí bylo motivováno jinak než korupcí.

dalším činností spojeným se získáváním energie. Energetická návratnost, tedy poměr mezi využitelnou energií získanou z daného zdroje a energií investovanou k jeho získání (angl. energy return on investment, EROI) je důležitým ukazatelem, který charakterizuje daný zdroj bez ohledu na ekonomické ukazatele jako rentabilita či návratnost investice. Je-li $EROI \leq 1$, nejedná se o zdroj energie, ale o médium na její přenos. Někdy se taková média nazývají sekundárními zdroji energie. Neznamena to ovšem, že takové médium nemá technický nebo ekonomický význam. Například vodík, akumulátory nebo palivové články jsou významnými sekundárními zdroji. Proměňují energii chemických vazeb na energii elektrickou, avšak účinnost této přeměny je vždy menší než 1 (1. věta termodynamická). Lze z nich tedy vyrobit vždy méně energie, než bylo vynaloženo na jejich získání.

Výpočet EROI pro různé druhy zdrojů je komplikovaný, vždy jde o odhad za použití zjednodušujících předpokladů. Hodnoty pro vybrané zdroje energie jsou uvedeny v Tabulce 1 (Murphy a Hall, 2010; Cílek a Kašík 2007). I když tyto hodnoty jsou nutně zatíženy chybou odhadu, z tabulky je jasně vidět, že energetická návratnost od počátků těžby ropy významně klesá s tím, jak ubývají zásoby snadno těžitelných fosilních paliv. Nové, tzv. alternativní zdroje mají většinou energetickou návratnost mnohem nižší než tradiční fosilní zdroje. To by mělo lidi, národohospodáře i jednotlivce, motivovat k šetření energií, avšak trend spotřeby je dosud opačný. Roste nejen celková spotřeba energie, ale i spotřeba na hlavu.

Tabulka 1: Hodnoty EROI pro vybrané druhy paliv a jiných zdrojů energie

Zdroj	Rok	EROI
Ropa a zemní plyn	1930 (USA)	> 100
Ropa a zemní plyn	1970 (USA)	30
Ropa a zemní plyn	2005 (USA)	11 - 18
Ropa a zemní plyn, světová produkce	1999	35
Zemní plyn	2010	10
Zkapalněný zemní plyn (LNG)		8
Ropné písky		5
Ropné břidlice		1,5
Jaderná energie		5 - 15
Hydroelektrárny		> 100
Větrné elektrárny		18
Fotovoltaické články		6,8
Ethanol (cukrová třtina nebo řepa)		0,8 - 10
Ethanol (obilí)		0,8 – 1,6
Bionafta		0,9 - 1,3

V souvislosti s pěstováním energetických plodin jako alternativních zdrojů energie je třeba uvážit i spotřebu vody, která je spotřebována na jednotku získané energie. Vyjadřuje se koeficientem EROWI (angl. energy return on water invested) v MJ na litr vody. Podle Muldera et al. (2010) je EROWI pro bioethanol 0,087, zatímco pro motorovou naftu (z ropy) je to 285, tedy hodnota o 4 řády vyšší. Rozšíření pěstování energetických plodin klade tedy velké nároky na přísun vody (jako každá zemědělská produkce), což se velmi pravděpodobně může stát limitujícím faktorem pro energetické využití biomasy.

Použitá literatura

EIA, U.S. Energy Information Administration 2011.

<http://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/showtext.cfm?t=ptb1101>, accessed Nov 27 2014

M. Braniš: Základy ekologie a ochrany životního prostředí. Informatorium, Praha 1999.

V. Cílek a M. Kašík: Nejistý plamen. Průvodce ropným světem. Dokořán, Praha 2007.

A. Heintz, G. Reinhardt: Chemie und Umwelt. Fridr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1991. Český překlad J. Šobr, Chemie a životní prostředí. VŠCHT Praha, 1993.

N.-A. Moerner, G. Etiope: Global and Planetary Change **2002**, 33, 185-203.

K. Moulder, N. Hagens, B. Fisher: Burning Water: A Comparative Analysis of the Energy Return on Water Invested. AMBIO **2010**, 39, 30-39.

D.J. Murphy, C.A.S. Hall: Year in review – EROI or energy return on (energy) invested. Ann. New York Acad. Sci. **2000**, 1185, 102-118.

J. Palatý, J. Paleček: Základy ekologie, VŠCHT Praha, 1992.