

Quo vadis ecosystems ?

Definice

Energie, je hlavním konceptem termodynamiky, je definována jako schopnost systému zapříčinit změnu, například konat mechanickou, termální, chemickou, elektrickou nebo jinou práci.

U živých systému se většinou zabýváme „tokem“ příslušné energie, nikoliv její statickou zásobou.

Energii měříme v Joulech.

Síla může být vyjádřena jako rychlost toku energie a měřena ve Wattech.

Emergie, je množství energie za slunce, které bylo na daném místě a v průběhu daného času použito k vytvoření daného systému, což může být ekosystém ale i umělý systém antropogenního původu.

Je měřena v jednotkách sluneční energie připadajících na jednotku vytvořeného systému.

Em-power, je rychlost toku energie měřená v jednotkách J/s

Exergy, exergie je maximálním množstvím energie, která může být získána ze systému, jeho převedení do stavu rovnováhy s prostředím, pod podmínkou, že supersystém: prostředí + systém je uzavřený. Bývá nazývána také volnou energií.

Procesy v ekosystémech

Všechny procesy v ekosystémech jsou nevratné (což je v podstatě formulace druhého zákona termodynamiky, která se zdá být v ekologii nejužitečnější). Všechny organismy potřebují dodávky energie pro udržení svých životních funkcí. Tato energie se ztrácí ve formě tepla do životního prostředí, což je v souladu s druhým zákonem termodynamiky.

Biologické procesy využívají zachycenou energii k tomu, aby se posunuly dále od termodynamické rovnováhy a udržovaly ve stavu s nízkou hodnotou entropie, vzhledem k jejich okolí.

Co se ale děje s ušlechtilou energií slunečního záření vstupující do ekosystému, jak je směřována, aby posouvala systém dále od termodynamické rovnováhy?

Posun ekosystému dále od termodynamické rovnováhy může být realizován pomocí tří procesů, z nichž první je v ekologii zdůrazňován nejčastěji.

růst biomasy systému, biomasa je rezervoárem volné energie slunečního záření, ovšem biomasa rovněž vyžaduje energii pro udržování (regenerace, procesy výživy), s procesy udržování je spojena disipace odpadního tepla: produkce entropie systému

růst komplexity sítě, to znamená efektivnější recyklace hmoty v systému a růst efektivity využití energie

růst informačního obsahu, zvyšování genetické a biologické diverzity, růst specializace v rámci ekosystému: posun od r-strategie ke K-strategii, takovíto živočichové produkují méně „odpadních produktů a nesou v sobě více informace.

Po počátečním zachycení energie uvnitř systému, je možný růst a vývoj ekosystému a to: vzrůstem hmoty energeticky bohatých sloučenin v systému (biomasy), zhuštěním sítě vztahů v ekosystému (zesílení recyklace hmoty v ekosystému) a vzrůstem informačního obsahu ekosystému. Všechny tyto tři procesy jsou spjaty s posunem systému od termodynamické rovnováhy a všechny jsou spjaty s:

- a) s exergií zachycenou v ekosystému
- b) s tokem energie přes systém (síla)

ekosystém se po zachycení slunečního záření bude snažit: maximalizovat exergetický obsah systému nebo maximalizovat sílu

v ekosystémech tedy pozorujeme fenomén růstu, který souvisí s množstvím biomasy a fenomén vývoje, který souvisí s růstem organizace systému, vzrůst organizace může probíhat nezávisle na růstu biomasy

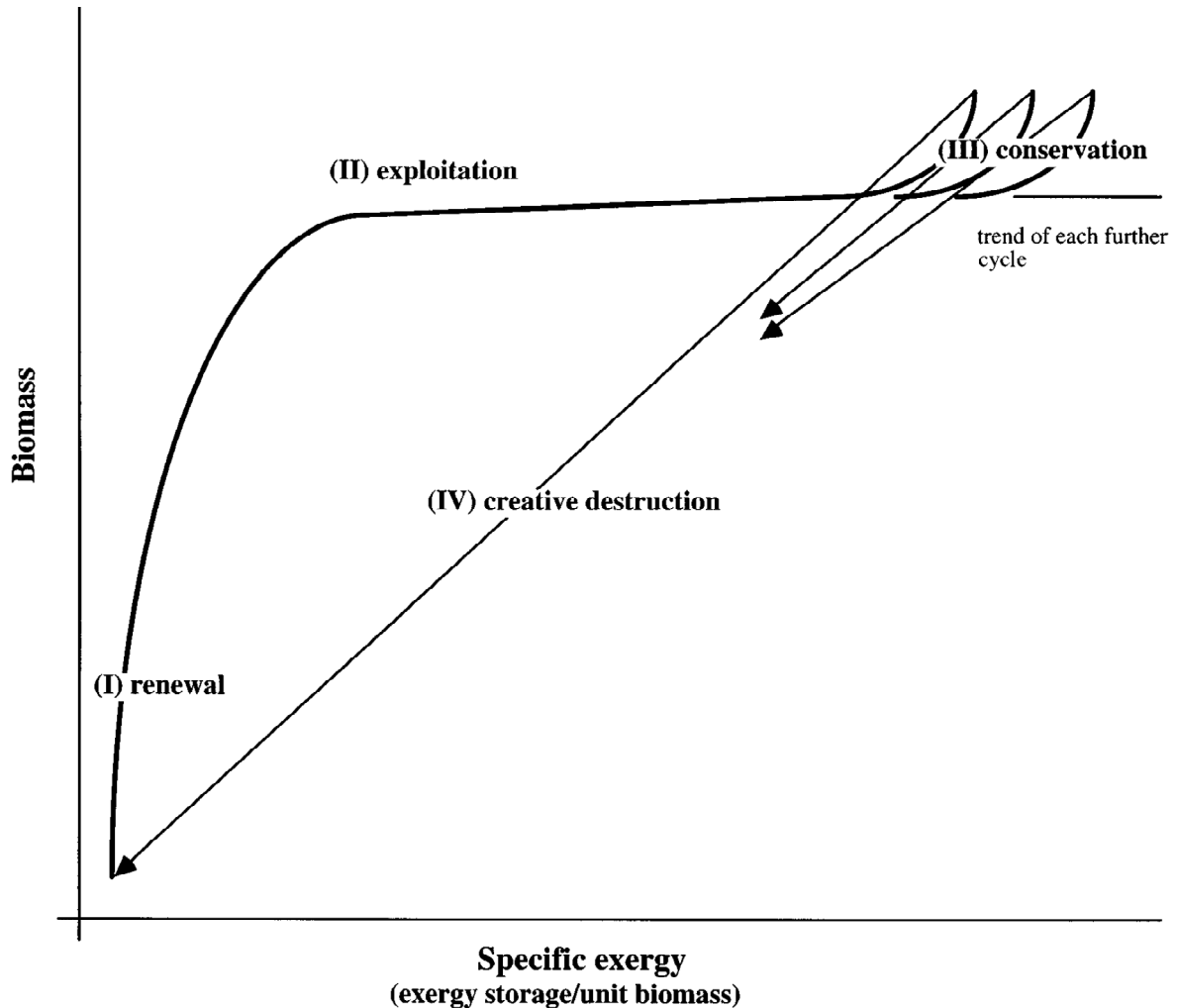
z termodynamického pohledu znamená růst biomasy a organizace systému posun dále od termodynamické rovnováhy

připomeňme, že gradienty tu rozumíme souřadnicově závislé a směrované rozdíly mezi intenzivními termodynamickými veličinami (gradient teploty, tlaku, chemického potenciálu)

Z energetického hlediska můžeme rozlišit několik fází vývoje ekosystému. V každé převažují jiná, z předchozích tří fází růstu, ty jsou spojeny s následujícími změnami:

1. biomasa ekosystému roste
2. změna počtu zpětných vazeb: během progresivní evoluce nárůst
3. nárůst respirace
4. respirace vzhledem k biomase klesá
5. specifická produkce entropie, vzhledem k biomase, klesá
6. celková produkce entropie stoupá a nakonec se ustálí na stálé úrovni

7. množství informace vzrůstá (více druhů, druhy s větším počtem genů, biochemie se více diverzifikuje)



Cyklický vývoj ekosystému by se dal charakterizovat následujícími fázemi: v první fázi roste prudce biomasa a tedy i celková respirace a produkce entropie: více biomasy, vyžaduje větší tok energie pro udržování.

Další fáze je spojena s utvářením sítě vztahů a zvýšením efektivity přerozdělení energie a cyklu hmoty: tedy stejný energetický vstup dokáže oproti předchozí fázi udržet více biomasy.

V třetí fázi pokračuje nahrazování r-strategů K-strategy, entropie produkovaná na jednotku hmoty klesá, celková produkce entropie však zůstává konstantní, stejný energetický vstup tedy opět dokáže „vyživit“ více biomasy.

Poté může následovat fáze kreativní destrukce: nutriční prvky z biomasy jsou vyvázaný. Z dlouhodobé evoluce je fáze kreativní destrukce nesmírně důležitá, jelikož dává prostor novým mutacím, novým způsobům hospodaření se zdroji, z nichž ty udržitelnější a stabilnější budou fixovány.

Jak popsat stav a směřování ekosystémů?

Zaměřme se nyní opět na ekosystémy.

Dále předložená koncepce termodynamických parametrů pro popis ekosystémů může působit poněkud utilitaristicky, protože budeme operovat s pojmy jako maximalizace užitečné práce, maximální využití slunečního záření, rovnováha mezi nabídkou a poptávkou a je tedy otázkou do jaké míry je ovlivněna dnešní „prorůstovou společností“.

Výhoda tohoto přístupu je ta, že umožňuje kvantifikaci stavu ekosystému a v ideálním případě tedy i posouzení stupně degradace ekosystému, například pod vlivem antropogenního stresoru.

Tento popis ovšem zcela určitě nevystihuje ekosystém v celé jeho komplexnosti, například krása ekosystému je jinou kategorií než účelnost.

Jelikož však chceme posoudit stabilitu ekosystému, nebudeme zde kategoriemi jako krása zabývat, mějme však na paměti, že náš popisný rámec vyzdvihuje pouze jisté aspekty vlastností ekosystému.

Naším cílem je tedy popsat stav ekosystému pomocí souboru veličin, které by odrážely:

- jeho vzdálenost od termodynamické rovnováhy, tedy sukcesní vyzrálost,
- evoluční směřování ekosystému
- stabilitu ekosystému
- míru jeho narušení člověkem

Pro popis stavu ekosystému na základě energo-matriálových a topologických úvah byly s ohledem na výše uvedené cíle definovány následující veličiny:

Ascendance (autor Ulanowicz)

Indikátor založený, který se dívá na ekosystém jako na síť trofických vztahů, vývoj ekosystému je pak popsán vývojem sítě těchto vztahů ve smyslu jejich růstu

Ascendance operuje s následujícími veličinami:

kapacita sítě (NC, network capacity), vyjadřuje možnou kapacitu sítě ve smyslu výměny informace

kapacita sítě může být chápána jako „cena“ udržování sítě ve stavu vzdáleném od termodynamické rovnováhy

průměrná informační interakce (AMI, average mutual information), vyjadřuje aktuální míru výměny informace

může být chápána jako „benefit“ získaný během „provozu“ sítě

zbytkový potenciál (OH, residual potencial)

platí:

$$NC = AMI + OH$$

celkový energo-materiálový tok systémem J, je sumou všech dílčích toků

ascendence je pak součinem aktuální informační výměny sítě a celkového toku:

$$Asc = J \times AMI$$

kde tok je extenzivní stavovou veličinou a průměrná informační interakce v systému intenzivní stavovou veličinou.

Ascendance tedy roste, pokud se zvyšuje tok energie systémem nebo pokud se zvyšuje „vyzrálost“ ekosystémové sítě. Ascendance má vztah k primární produkci.

Energie (autor Odum)

Energie je definována jako množství ekvivalentů sluneční energie potřebné k vyvolání daného toku:

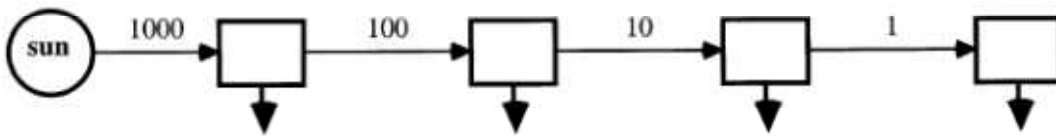
$$Em = \sum_{i=1}^N Tr_i J_i$$

Kde Tr_i je bezrozměrný faktor *transformance* určující, kolik sluneční energie je třeba k vyvolání daného toku. Živočichové na vyšší trofické úrovni, mají vyšší faktor transformace.

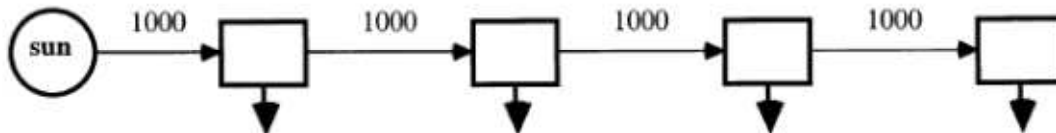
Energie může být interpretována jako cena daného ekosystému a jeho udržování v jednotkách sluneční energie.

Energie je extenzivní stavovou veličinou a udává, kolik sluneční energie je třeba pro výstavbu různých „typů“ biomasy.

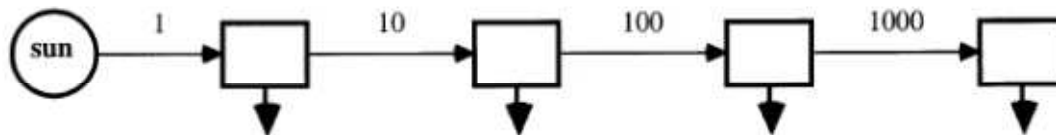
Energy flow (kj/m² h)



Solar equivalents (kj/m² h)



Embodied energy (transformity) = solar energy equivalents (kEmj/m² h)



Indikátory nabídky a poptávky (supply – demand indicators)

stojí na dvou předpokladech:

- bylo empiricky zjištěno, že celkový výkon metabolických procesů v ekosystémech je následující funkcí hmotnosti (biomasy) příslušných organismů:

$$r \propto M^{3/4}$$

z toho vyplývá, že specifická rychlost metabolismu s rostoucí hmotností klesá

- ekosystém může být popsán sítí objektů a toků

pokud označíme energetický výstup z ekosystému jako E_{out} , pak je dle předchozích principů ve vztahu s celkovou biomasou:

$$E_{out} \propto B^\alpha$$

potom je ovšem v korelaci i rychlost toku energie z každé části (jedince, subsystému) ekosystému s hmotností této části ekosystému (jedince, subsystému)

jelikož jednotlivé části jsou troficky provázána, můžeme to samé tvrdit i o energetickém vstupu do subsystému nebo jedince:

$$r_s \propto B^{x_s}$$
$$r_d \propto B^{x_d}$$

Potom lze E_{out} vyjádřit jako:

$$E_{out} = \left(B \frac{x_s}{x_d} \right)^\alpha = B^{\alpha(1+x_d-x_s)}$$

Ve stabilním, evolučně vyzrálém ekosystému potom platí:

$$r_s = r_d \Rightarrow x_s = x_d$$

a zároveň:

$$\alpha = \frac{D}{D+1}$$

kde D značí fyzikální dimenzi sítě

Exergie

Koncept exergie

Koncept entropie byl mnohdy kritizován jako nevhodný k užití pro popis živých systémů (Ostwald).

Proto byly vypracovány jiné popisné rámce založené na množství užitečné práce obsažené v systému.

V zásadě u termodynamických systémů rozlišujeme dva druhy práce, v tomto rozdělení hraje klíčovou roli vztah systému a jeho prostředí, konkrétně je to:

- práce, kterou vykonává systém na svém prostředí
- práce, kterou vykonává prostředí na systému

jedná se o nesymetrické interakce

Dle konvence má práce A , vykonaná systémem na prostředí záporné znaménko, u práce vykonané prostředím na systému je znaménko kladné.

Nazvěme systém a jeho okolí supersystémem a uvažujme, že tento supersystém je izolovaný a dvě jeho zmíněné části jsou v nerovnováze.

Při přechodu do rovnovážného stavu může systém vykonat jistou práci, jejíž hodnota závisí na cestě, kterou bylo rovnovážného stavu dosaženo. Každá z těchto cest, vedoucích k rovnovážnému stavu (termodynamické rovnováže) může obsahovat jistý počet mezistavů.

Jaká je hodnota maximální práce, kterou lze získat u nerovnovážného systému během jeho přechodu k termodynamické rovnováže?

V přírodním prostředí se často setkáváme s nerovnovážnými systémy vyvíjejícími se za konstantního tlaku a teploty, za těchto podmínek je maximální práce vykonaná systémem popsána změnou Gibbsovy volné energie:

$$\Delta A_{\max} = -\Delta G$$

Z hlediska evoluce systému dosahuje tedy Gibbsova energie v termodynamické rovnováže svého minima (během evoluce totiž klesá).

Exergie je definována jako maximální množství užitečné práce, které je systém schopen vykonat, cestou k rovnovážnému stavu (termodynamické rovnováže) ze svým prostředím.

Rozdíl mezi exergií a volnou energií (energií dostupnou pro konání práce) je v tom, že pro případ exergie, můžeme v jednotlivých případech zvolit vhodný referenční stav.

Růst a vývoj živých systémů souvisí s uspořádáním materiálu do vysoce organizovaných struktur, oproti referenčnímu stavu (prostředí), vytvoření tohoto řádu vyžaduje práci.

Pro účely měření exergie v ekosystémech je vhodné vzít za referenční stav situaci, kdy jsou všechny sloučeniny anorganické a v maximálním oxidačním stavu.

To znamená, že volná „chemická“ energie je nulová.

Exergie závisí na intenzivních parametrech systému a velmi dobře popisuje vztah mezi systémem a jeho prostředím, což je důležité pro její aplikace v ekologii.

Exergie se nezachovává, pokud není proces vratný, všechny nevratné procesy na úrovni „supersystému“ ke ztrátě exergie

Ztráta exergie při nevratných dějích je spojena s procesy vedení tepla, difúze, turbulence a chemickými reakcemi.

Většinou se mění formy energie schopné konat práci na formy energie, které práci nejsou schopny konat, například vzpomeňme na příklad zelených rostlin a přeměny uspořádaného slunečního záření na tepelný (chaotický) pohyb molekul

Poměr celkové exergie systému a celkové energie systému vypovídá o schopnosti systému konat práci a míře jeho organizace.

Celkovou energii systému lze z hlediska její schopnosti konat práci rozdělit na dva členy:

$$E_t = Ex + A_{en}$$

Kde Ex značí exergii, čili energii v systému, která je schopná konat práci a A_{en} , energii, která nemůže konat užitečnou práci, nazvanou anergie

V souvislosti s druhým zákonem termodynamiky je změna anergie pro systém a jeho prostředí vždy pozitivní.

Exergie se zdá být dobrým popisným rámcem nerovnovážných systémů schopných samorganizace (živých systémů), jelikož je přímějším a pochopitelnějším způsobem nežli entropie spjata s pojmem energie a vyjadřuje přímo schopnost systému konat práci.

Rovněž usnadňuje popis nízko-entropické a vysoko-entropické energie.

Exergie je vhodným měřítkem rozdílu volné energie mezi ekosystémem a jeho prostředím, pokud daný ekosystém a jeho prostředí mají stejnou teplotu a tlak.

Pokud se systém nachází ve stavu rovnováhy se svým okolím, hodnota jeho exergie je nulová.

Jediným způsobem, jak dostat systém ze stavu termodynamické rovnováhy, je vykonat na něm jistou práci, proto je užitečná práce dodaná systému i dobrým měřítkem jeho vzdálenosti od termodynamické rovnováhy.

Ekosystémy mají, díky energetickým tokům zvnějšku, tendenci snižovat svoji entropii a zvyšovat míru své exergie a míru informace.

Můžeme proto tvrdit, že ekosystémy během své evoluce tíhnou ke stavu s nejvyšší exergií.

To je také podle některých názorů cíl evoluce ekosystémů (viz dále).

Míra maximální exergie pro daný ekosystém závisí na jeho sukcesní a evoluční zralosti a také na podmínkách stanoviště, kde se daný ekosystém nachází.

V minulých přednáškách byl rozebrán výraz pro změnu entropie systému, popřípadě pro rychlost této změny,

Pro exergii můžeme zapsat analogický vztah:

$$dEx = d_i Ex + d_e Ex$$

Otevřené systémy mohou udržovat nerovnovážný stacionární stav a kompenzovat ztráty exergie spjaté s nevratnými procesy v nich díky přísunu exergie z vnějšího prostředí (sluneční záření).

pro otevřený systém platí:

$$d_i Ex < 0$$

$$d_e Ex > 0$$

pokud je $|d_i Ex| < d_e Ex$

system má přebytek exergie a může zvyšovat svou vnitřní uspořádanost, což je u našich ekosystémů z hlediska ročního cyklu běžný případ v jarním a letním období.

Jak lze vyčíslit exergii ekosystému?

Přesně vzato, exergie, původně navržená jako veličina kvantifikující schopnost systému konat užitečnou práci, byla v případě biologických systémů rozšířena tak, aby zahrnovala, jak energii přeměnitelnou v práci (uloženou v biomase), tak informační obsah živých systémů.

Vyčíslit informaci uloženou v ekosystémech není zcela jednoduché.

Pro odhad se většinou uvažuje informace uložená v genomu druhů tvořících příslušný ekosystém.

Nedokonalost tohoto přístupu je zřejmá, jelikož neuvažuje informaci obsaženou ve struktuře ekosystému: tj. skládá celkovou informaci obsaženou v ekosystému pouze jako součet informačního obsahu jednotlivých druhů.

Tento přístup tedy podhodnocuje množství informace obsažené v ekosystému.

V nejhrubší aproximaci lze exergii ekosystému vyjádřit čistě na základě „chemické“ energie biomasy:

$$Ex = \sum_c (\mu_c - \mu_{c0}) N_i$$

kde $\mu_c - \mu_{c0}$ je rozdíl chemických potenciálů mezi ekosystémem a tím stejným systémem, který dosáhl termodynamické rovnováhy a N_i je počet i -té komponenty.

Pokud využijeme definice chemického potenciálu, dostáváme:

$$Ex = RT \sum_{i=0}^n C_i \ln \left(\frac{C_i}{C_{i,0}} \right)$$

Kde R je univerzální plynová konstanta, T je teplota prostředí,

C_i je koncentrace i -té komponenty vyjádřená v použitelných jednotkách, například v případě fytoplanktonu v jezerech může být vyjádřena jako mg/l biomasy nebo mg/l živin.

C_{i0} je koncentrace i -té komponenty při termodynamické rovnováze s prostředím.

n je počet komponent

Je zřejmé, že C_{i0} bude velmi nízkou hodnotou, jelikož pravděpodobnost nalezení složitých organických molekul je ve stavu termodynamické rovnováhy velmi nízká.

Jelikož náhodná formace vysoce organizovaných struktur vzniklých biosyntézou je velmi nepravděpodobná, vypovídá jejich přítomnost v systému o tom, že genetický kód přenášející informaci pro jejich syntézu a uspořádání, by měl být správný.

Pokud chceme výraz pro exergii vyjádřit jako součet dvou členů, tj. příspěvku biomasy a informačního obsahu, zavedeme novou proměnou p_i , definovanou jako C_i/A , kde A je celkové množství hmoty v systému:

$$A = \sum_{i=1}^n c_i$$

pokud A aproximujeme celkovým množstvím biomasy v systému, dostáváme vztah

$$E_x = ART \sum_{i=1}^n p_i \ln \left(\frac{p_i}{p_{i,0}} \right) + A \ln \left(\frac{A}{A_0} \right)$$

Pokud navíc považujeme celkové množství hmoty v systému v referenčním a zkoumaném vztahu za konstantní, tedy $A = A_0$, dostáváme:

$$E_x = ART \sum_{i=1}^n p_i \ln \left(\frac{p_i}{p_{i,0}} \right)$$

Výraz za součinem ART , je znám z teorie informace, informačního vyjádření entropie, ale stejnou formu zápisu má třeba i Shannonův-Weaverův index pro biodiverzitu, samozřejmě jednotlivé veličiny zde značí něco jiného.

Zdůrazněme ještě, že p_i , může být interpretována také jako pravděpodobnost, s jakou příslušná složitá sloučenina (soubor sloučenin, který se započítává do biomasy) o dané hmotnosti bude nalezena v daném ekosystému, $p_{i,0}$, pak vyjadřuje pravděpodobnost nalezení této sloučeniny ve stavu termodynamické rovnováhy.

Na základě pozorování přirozených ekosystémů se zdá, že platí následující tvrzení:

Pokud ekosystém obdrží jistou dávku exergie, využije tuto exergii k tomu, aby vykonal práci nutnou k udržení ekosystému dále od termodynamické rovnováhy, přičemž tato exergie je ztracena přeměnou v teplo.

Pokud po této události ještě nějaká exergie zůstává, využije ji systém k tomu, aby se posunul dále od termodynamické rovnováhy, což znamená nárůst jistých gradientů.

Nárůstem exergie v biomase a „informační“ exergie se dá tedy vysvětlit spění ekosystému do stavu dále od termodynamické rovnováhy: spění systému do stavu s vyšší uspořádaností.

S ohledem na cíl evoluce ekosystému, byly formulovány následující „exergické“ hypotézy:

Pokud existuje více cest, kterými se systém může od termodynamické rovnováhy posunout, vyvíjí se ekosystém díky autoregulaci po takové, která mu umožní dospět nejdále od termodynamické rovnováhy, ze všech možných cest za daných podmínek.

Toto zjištění se dá vyjádřit i takto: z mnoha cest, kterými se může ekosystém posouvat dále od termodynamické rovnováhy, je vybrána ta, **která vede k maximalizaci výrazu dEx/dt za daných podmínek.**

Exergie a účinnosti biologických procesů.

Exergii můžeme tedy jako schopnost systému konat užitečnou práci. Budeme-li porovnávat množství užitečné práce, které je systém schopen vykonat s vnitřní energií systému U , můžeme definovat novou veličinu: koeficient efektivity η_{max} .

Maximální hodnota koeficientu efektivity pro daný systém je potom rovna:

$$\eta_{max} = dA_{max}/dU = d(Ex)/dU = T-T_0/T$$

V případě environmentálních procesů značí T_0 teplotu prostředí.

Odvození vychází opět z Gibsovy rovnice a jejího vztahu k maximální práci, kterou má daný systém schopnost vykonat.

Poslední člen předchozího vztahu má svůj původ v členu spojujícího maximální práci s procesy stlačení a expanze a s chemickými procesy, které se jsou spojeny s přenosem tepla

$$dA_{max} = (T - T_0)dS$$

Podíváme-li se na vztah:

$$\eta_{max} = T-T_0/T$$

Koeficient efektivity by byl rovný 1 (100%), pouze pokud by T_0 byla rovná 0, ovšem víme, že i teplota prázdného vesmírného prostoru je 2,7 K.

Vidíme, že u reálných procesů probíhajících v životním prostředí bude tedy η_{max} vždy menší, než 1 (100%). Ovšem, jak již bylo řečeno, reálné systémy nevykonají většinou maximální možnou práci (pokud je proces ireverzibilní).

Připomeňme, že maximální možná práce odpovídá reverzibilní práci Carnotova cyklu, tedy maximální možné práci, kterou systém může vykonat s ohledem na druhý zákon termodynamiky.

Ireverzibilní procesy ovšem pracují s menší účinností, než odpovídá maximální možné práci, proto zavádíme ještě koeficient užitečnosti u_t , definovaný jako:

$$u_t = \eta / \eta_{max} = dA/dU / dA_{max}/dU = dA/dA_{max}$$

Díky těmto veličinám je možno odhadnout tok exergie mezi systémy nebo v rámci systému, ovšem s tím, že není zahrnuta exergie spjatá s informačním obsahem systému.

Přesto nám výše popsané veličiny umožní interpretovat některé jevy klíčové pro fungování ekosystémů a jejich evoluci.

Podíváme-li se na atmosféru jako na velký stroj, který přenáší energii slunečního záření k povrchu Země, pak můžeme vypočítat maximální možnou efektivitu tohoto procesu.

Uvažujme systém stratifikovaný na troposféru, stratosféru a zemský povrch rozdělený na oceán a pevninu.

Jedna část systému v tomto případě získává exergii a druhá ji ztrácí, jedna část přijímá teplo nebo krátkovlnné záření, druhá ji ztrácí.

Kdyby v atmosféře neexistovaly žádné gradienty, neprobíhaly by zde žádné procesy a neexistoval by ani koloběh vody atd.

Teplota tropopauzy, kde nacházíme teplotní skok mezi troposférou a stratosférou je 220 K, teplejší část má 300K, potom „Carnotova“ účinnost je:

$$\eta_{max} = 300 - 220/300 = 26,7\%$$

Tím jsme zjistili maximální možnou efektivitu tohoto procesu při daných podmínkách.

Pokusme se nyní vypočítat reálný koeficient efektivity na základě údajů o příchozím a odchozím slunečním záření:

Energie slunečního záření dopadajícího průměrně na 1 m² povrchu je $Q_s = 240 \text{ W.m}^{-2}$.

Množství záření, které je v tomto případě skutečně pohlceno je $Q_{abs} = 15 \text{ W.m}^{-2}$, přičemž platí $dA_{max} = Q_s$ a $dA = Q_{abs}$

Potom je $\eta = u_t \eta_{max} = 15/240 \cdot 0,267 = 1,67\%$

Tento údaj lze interpretovat jako účinnost atmosférického systému při přenosu exergie ze slunečního záření k povrchu země.

Na základě naměřených údajů můžeme interpretovat „Carnotovu“ účinnost fotosyntézy, rozdíl teploty listu a jeho okolí se během vegetační doby pohybuje průměrně okolo 5 K.

Potom získáme:

$$\eta_{max} = 5/298 = 1,68\%$$

Tato hodnota, jakkoliv je přesná, ukazuje na jisté principiální omezení, kterému jsou autotrofní organismy vystaveny. Procesy vedoucí k syntéze a ukládání organických látek

v živém organismu a tedy i celém ekosystému nelze neomezeně zintenzivňovat zvyšováním účinnosti fotosyntézy, ba co víc, prostor pro zintenzivnění těchto procesů není tak velký, jak by se mohlo na první pohled zdát.

Rostliny tedy využívají i jiných cest, jak zužitkovat co největší část dopadajícího slunečního záření, například důmyslné soustavy asimilačních orgánů (listy, jehlice) na nosičích fraktální struktury (větve), které umožňují maximalizovat plochu přicházející do styku se slunečním zářením.

S pomocí koeficientů účinnosti můžeme odhadnout efektivitu globálního cyklu uhlíku, v rámci něhož dochází k ukládání uhlíku do biomasy.

Z Gibsovy rovnice a dalších vztahů vyplývá, že pro účinnost chemických procesů platí:

$$|dA_{max}| = d(Ex) = \sum_{i=1}^n (\mu_i - \mu_i^0) dN_i$$

Pro změnu vnitřní energie v průběhu chemické reakce potom platí:

$$dU = \sum_{i=1}^n \mu_i dN_i$$

a tedy:

$$\eta_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_i - \mu_i^0) dN_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i dN_i}$$

S pomocí těchto vztahů můžeme vypočítat účinnost globálního cyklu uhlíku při převodu uhlíku do živé biomasy. Tato účinnost úzce souvisí s fotosyntézou, jelikož globální vegetace je hlavním rezervoárem uhlíku vázaného do živé biomasy a rovněž je klíčovou složkou pro vstup organicky vázaného uhlíku i do ostatních živočichů skrze potravní řetězec.

Uvažujme jistý výchozí stav: množství uhlíku v globální vegetaci C_0 , v počáteční fázi prostředí předá systému jistou exergii, což se projeví ve vzrůstu množství uhlíku vázaného ve vegetaci, přechod systému z C_0 do c můžeme vyjádřit rovněž pomocí čisté průměrné roční produkce biomasy globálního ekosystému:

$$C_0 \rightarrow C = C_0 + \text{NNP}$$

Chemický potenciál uhlíku v biomase vyjádříme aproximativně pomocí vztahu pro chemický potenciál sloučeniny o koncentraci c jehož obecné vyjádření je:

$$\mu = \mu(0) + RT \ln[c]$$

Kde $\mu(0)$ neboli je chemický potenciál dané látky při jednotkové koncentraci za jasně definovaných podmínek, tedy konstanta závislá na povaze látky a její teplotě.

Dosažením do η_{max} a zjednodušením dostáváme:

$$\eta_{max} = RT_0 \ln(C/C_0) dC / [\mu(0) + RT_0 \ln C]$$

Což přepíšeme jako:

$$\eta_{max} \approx \ln(1 + NNP/C_0) / \ln(C_0 + NNP)$$

V tomto výrazu jsme vypustili konstanty μ_0 a RT_0

Odhady pro C_0 a NNP jsou 610 Gt a 60 Gt, dosažením do předchozího vztahu získáme hodnotu η_{max} 1,44%

Pouze na základě znalostí o množství uhlíku v živé biomase a celkové roční produkci globální vegetace jsme získali údaj o účinnosti globálního ekosystému při převodu uhlíku do živé biomasy.

Tento údaj úzce souvisí s účinností fotosyntézy a také s ním dobře souhlasí.

Druhý způsob výpočtu koeficientu efektivity, který zahrnuje globální cyklus uhlíku, používá již naměřené údaje vztahující se přímo k fotosyntéze, totiž roční produkci biomasy globální vegetací, zatímco první, vycházející z rozdílu teploty prostředí a asimilačních orgánů představuje velmi obecnou termodynamickou limitu účinnosti fotosyntézy.

To, že se oba údaje téměř shodují, představuje krásný důkaz prediktivní síly některých obecných principů.

Koncept exergie a degradace ekosystémů

Koncept exergie nám umožňuje rovněž kvantitativně vyjádřit míru, s jakou člověk poškozuje globální ekosystém.

Pokud jsou například těžké kovy mobilizovány ze svých rud a rozptýlovány do prostředí, projeví se to vzhledem k jejich toxicitě ztrátou exergie z ekosystémů.

Na základě rozdílu mezi průměrnou koncentrací těžkého kovu v rudě c_{ore} a jeho „pozadovou“ koncentrací ve znečištěném prostředí (intenzivní veličiny) c_{dis} a celkovým množstvím kovu uvolněného v souvislosti s antropogenní činností do prostředí (extenzivní veličina), může být určena ztráta exergie ekosystémů.

Například může být vypočítána ztráta exergie související se znečištěním prostředí olovem.

V dobách, kdy se olovo přidávalo do benzínu za účelem zvýšení jeho oktanového čísla, bylo ročně do ovzduší vypuštěno ročně zhruba 400 000 t Pb.

Toto olovo se postupně rozptyluje v celoplanetárním měříku.

Průměrná koncentrace Pb v rudě je 0,05 kg Pb na kg horniny, průměrná koncentrace Pb v současném znečištěném prostředí je 1 µg na kg půdy. Molární hmotnost Pb je 207 g/mol, uvažujeme teplotu 300 K.

Ztráta exergie v souvislosti s tímto procesem během jednoho roku je průměrně rovna:

$$\Delta Ex = RT_0 \cdot \ln \left(\frac{C_{core}}{C_{dis}} \right) \Delta C$$

Což po vyčíslení dá 85000 GJ ročně, pouze pro Pb v důsledku jeho přidávání do benzínu.

Nutno poznamenat, že v tomto údaji není zahrnuta ztráta exergie související se ztrátou informace v živých organismech a ekosystémech po jejich interakci s olovem.

Pro některé další kovy, jsou ztráty následující (v GJ/rok):

Cr 32000

Ni 15000

Zn 80000

Cu 18000

Hg 27000

„Čtvrtý zákon termodynamiky“

Empirické a semiempirické závěry o fungování a evoluci ekosystémů

V souvislosti s příjmem energie do živých systémů pozorujeme například tyto jevy:

Ve vyšších zeměpisných šířkách je menší biodiverzita a ekosystémy mají jednodušší strukturu.

Například Odum pomocí svých energetických diagramů ukazuje, menší přísun energie ve větších zeměpisných šířkách způsobuje větší konkurenci o příslušné niky a vede tak k eliminaci jistých druhů.

Snížení druhové bohatosti ekosystémů zapříčiňuje oslabení některých procesů a nižší úroveň primární produkce, tento jev se dá vysvětlit tak, že snížení druhové bohatosti vede ke snížení informačního obsahu systému, což odchýlí ekosystém od jeho vývojové trajektorie.

Naopak byl pozorován růst čisté produkce v souvislosti s homogennějším rozložením druhů v systému (Wilsey and Potvin, 2000).

Byly provedeny studie, ve kterých byl uměle zvýšen informační obsah ekosystému, právě zvýšením rovnoměrnosti zastoupení druhů. Takové systémy se potom posunuly dále od termodynamické rovnováhy.

Výsledkem tedy bylo vytvoření efektivnější disipativní struktury, optimalizují zachyt exergie a vykazující vzrůstající množství biomasy a exergie.

Proudy v mořských ekosystémech snižují dopady konkurence a predace a způsobují lokální vzrůst biodiverzity.

Zvýšenou kompetici u některých ekosystémů lze vysvětlit zvýšenou úmrtností některých druhů (Salamolard et al., 2000):

Pokud je snížena regionální biodiverzita (například v důsledku zemědělské činnosti), predátoři vyhledávají alternativní stravu, tak, aby byly oslabeny oscilace predátor-kořist.

Obecně platí, že biologická evoluce směřuje k rostoucímu počtu genů a diverzitě buněčných typů. To lze považovat za důkaz vzrůstu informačního obsahu živých systémů během evoluce, který se na základě předešle uvedeného vztahu projeví i vzrůstem exergie.

Další studie dávají do souvislosti míru vyšší rezistenci ekosystému s jeho rostoucí biodiverzitou, srovnáváme-li systémy blízké dynamické rovnováze.

Za předpokladu, že druhy se vyskytují v dostatečném množství a lokální podmínky jsou adekvátní ke splnění jejich základních požadavků, pak porostou všude, kde budou mít příležitost: druhy mají tendenci obsadit každou volnou niku.

Zajímavý je z tohoto pohledu rozbor situace s ektoparazity: stabilní populace parazita nezatěžuje fyziologii hostitelských ptáků a pomáhá udržovat roli hostitelské populace v ekosystému.

Ve zdrojově bohatším prostředí působí více druhů, existuje tedy i bohatší síť mezidruhových vztahů a tedy ekosystém má i větší informační obsah.

Dalším příkladem může být vztah mezi druhovou bohatostí a primární produkcí zkoumaný u 33 jezer. Ukázalo se, že vyšší úroveň ukládání exergie na úrovni primárních producentů umožňuje vyšší zisky exergie i v dalších trofických úrovních ekosystému, což vede ke vzniku pozitivní zpětné vazby, v důsledku níž obsah exergie stoupá na všech trofických úrovních.

Ovšem pokud je jezerní ekosystém zatížen eutrofizací, vede to k tomu, že pouze několik druhů dokáže využít těchto nových podmínek, což v delším horizontu vede k poklesu informačního obsahu ekosystému a posunu blíže k termodynamické rovnováze.

Z druhů přítomných v ekosystému během jeho evoluce jsou nejvýznamnější ty, které do ekosystému přinášejí takové struktury a interakce s jinými druhy, které ekosystému umožní dostat se dále od termodynamické rovnováhy.

V prostředí s nenaplněnou kapacitou (volnými nikami) jsou upřednostňovány druhy, které rychle využijí volné niky a zvětší rychle exergii uskladněnou v systému: tzv. r-stratégové.

Podmínky prostředí rozhodnou o tom, zda bude vývoj ekosystému pokračovat v tom směru, že převládnu druhy tolerující stres a směřující k symbiotickým interakcím (K- strategové) a tedy posilující rezistenci ekosystému nebo druhy snášející disturbance vlivem extrémního prostředí (r-strategové).

Jisté nedostatky v prostředí ovlivňují specifické vlastnosti druhů. V průběhu evoluce se tedy spolu s ekosystémy vyvíjí i druhy. Vývoj ekosystému se tedy děje na úrovni:

- vztahů mezi druhy
- vlastností druhů

tento proces úzce souvisí se schopností druhů zastávat v ekosystému příslušné funkce, respektive funkčně zapadat do struktury ekosystému.

V průběhu evoluce ekosystému se tedy nejprve utváří vztahy mezi druhy a probíhá selekce, která rozhodne o tom, který druh bude schopen „zapadnout“ do funkčních vztahů uvnitř ekosystému a následně nebo souběžně probíhá i evoluce druhů a to vše ve smyslu maximálního možného využití zdrojů na daném stanovišti, a tedy maximalizace parametru dEx/dt .

Sukcese na daném stanovišti je tedy jistým sledem událostí, do jisté míry předvídatelných a to v tom smyslu, že dané stanoviště je dostupné pouze určité množině druhů a dané stanoviště je charakterizované jistou paletou zdrojů.

Li (2002) ukazuje, že změna termodynamických parametrů prostředí ekosystému, ve smyslu sukcese, pokud se zabýváme systémy vzdálenými od termodynamické rovnováhy, vede k opuštění původní dynamické rovnováhy následovanému nerovnovážným fázovým přechodem a dosažením nové dynamické rovnováhy, která však odpovídá exergicky bohatšímu ekosystému.

Je důležité zdůraznit, že prostředí má na vývoj ekosystému značný vliv, v tomto smyslu je důležité rozlišovat vnitřní prostředí ekosystému (mesoprostředí), které ekosystém svým působením přímo modifikuje a vnější prostředí (makroprostředí), které lokální ekosystém může ovlivnit jen zanedbatelně (asymetrie účinku prostředí na ekosystém a ekosystému na prostředí).

Zdůrazněme, že cíl sukcesního vývoje je značně ovlivněn makroprostředím, často můžeme pozorovat reorganizaci systému působením vnějších vlivů, příkladem může změna prostředí v souvislosti s antropogenní činností, takové změny mohou vést ke ztrátě neudržitelné biomasy a po reorganizaci k návratu systému do stavu dynamické rovnováhy s možností dalšího vývoje

Několik současných verzí „4. zákona termodynamiky“

Kam ekosystémy směřují? Proč okolo této elementární otázky stále panují nejasnosti a rozpory, přestože věda dnes dokáže odpovědět na mnohé otázky ze světa kvantové fyziky i ze světa dalekých Galaxií?

Pokud pozorujeme evoluci nebo sukcesi ekosystému, vidíme spění ke stále větší komplexnosti a tendenci využít ekologických nik v maximální možné míře.

Zdá se tedy, že živé systémy směřují samovolně k jistému cíli.

Proto se ekologové snaží formulovat takový termodynamický zákon, který by doplnil první tři (čtyři, včetně nultého) a vznikl by tak popisný rámec schopný podat přehlednou informaci o chování a evoluci živých systémů.

Jedním z prvních, kdo spojil nerovnovážnou termodynamiku s popisem evoluce ekosystémů byl Alfred James Lotka (March 2, 1880 – December 5, 1949).

Lotka, známý teoretický ekolog, jehož jméno je spojeno s rovnicemi popisujícími závislost velikosti populace kořisti na velikosti populace predátora, se zabýval rovněž souvislostmi mezi druhým zákonem termodynamiky a evolucí ekosystémů.

Lotka formuloval názor, že ekosystém spěje do jistého stavu, který je charakterizován maximem jisté veličiny.

Tato hypotéza bývá označována také jako princip maximální síly, Lotkův–Odumův princip maximální síly atd.

Zdá se však, že reinterpretační původních Lotkových článků z let 1921-1922 pozměnila původní Lotkův názor.

Lotkův názor zní, že ekosystém se během své evoluce snaží **optimalizovat tok užitečné energie, která u ekosystémů s první trofickou úrovní zelených rostlin, pochází z energie slunečního záření.**

Tyto Lotkovy práce jsou považovány za základ ekologické termodynamiky, protože dávají do souvislosti fines organismu nebo ekosystému s jeho schopností zachytit energii dostupnou v prostředí.

Díky zřejmému spojení tohoto principu s Darwinovým konceptem fitness, bývá tento princip nazýván Lotka-Darwinovým principem.

Tento názor může být vyjádřen pomocí již představeného Principu maximální produkce entropie (Ziegler) nebo principu minimálního uchování entropie v ekosystému (Prigogine) pouze za jistých dalších předpokladů.

Lotka ve své práci hovoří o volné (dostupné) energii v souladu s Gibbsovou definicí a odvolává se Boltzmanovu práci.

Pokud jsme při energetické analýze trofických řetězců přišli s tvrzením, že navýšení toku volné energie z prostředí do ekosystému, které trvá v časovém měřítku relaxačního času biosféry, může vést k prodloužení trofického řetězce, pak je to zcela v souladu s Lotkovým tvrzením:

„If sources are presented, capable of supplying available energy in excess of that actually being tapped by the entire system of living organisms, then an opportunity is furnished for suitably constituted organisms to enlarge the total energy flux through the system”

Tento svůj Lotka považuje za podložený na základě pozorování a dále jej upřesňuje:

„In every instance considered, natural selection will so operate as to increase the total mass of the organic system, to increase the rate of circulation of matter through the system, and to increase the total energy flux through the system, so long as there is presented a unutilized residue of matter and available energy”

Vzhledem k tomu, že v této formulaci je kladen důraz na tok energie přes systém, který naroste pokaždé, je-li ekosystém vystaven toku dosud nezužité energie, Lotkův názor formulovat také jako „princip maximálního toku volné energie“.

Jelikož volná energie odpovídá exergii, lze tento princip nazvat také „principem maximálního toku exergie“.

V přednášce o superorganismu je naznačeno, jak může být princip maximálního toku exergie ekosystémem v evoluci „prosazován“ skrze přirozený výběr.

Od Lotkových dob se snažilo mnoho dalších autorů formulovat 4. zákon termodynamiky na základě energetických interakcí mezi ekosystémem a prostředím a to tak, aby bylo pokud možno popsáno samovolné směřování ekosystémů dále od termodynamické rovnováhy.

V těchto principech se objevují veličiny, s kterými jsme se již seznámili, s tím, že v cíli evoluce nabývají extrémních hodnot:

- maximum entropy formation or dissipation (Aoki, 1988),
- minimum excess entropy (Mauersberger, 1995),
- minimum dissipation (Johnson, 1995),
- maximum exergy storage (Mejer and Jørgensen, 1978; Jørgensen and Mejer, 1981; Jørgensen, 1982),
- maximum exergy degradation or destruction (Kay and Schneider, 1992, 1994) and maximum ascendancy (Ulanowicz, 1980).

Některé tyto principy lze spojit se snadno měřitelnými procesy v ekosystémech, například:

Exergie: udržitelná biomasa

Produkce entropie: intenzita metabolismu, buď celého systému, nebo vztažena na jednotku hmoty (specifická entropie)

Ascendance: primární produkce

Disipace a ukládání volné energie jako hlavní inspirace formulace 4. zákona termodynamiky

Do ekosystému vstupuje energie zvenčí, tato energie je částečně zadržena v ekosystému a částečně disipována zpět do prostředí.

Princip maximální exergie (PMEx) tvrdí, že cílem evoluce ekosystému je **dosáhnout stavu s maximální možnou exergií**.

Exergie je v ekosystému uložena v jeho biomase, ve struktuře vztahů a jako „informační“ exergie v DNA organismů tvořících ekosystém.

Znamená to tedy, že v průběhu evoluce ekosystému jeho exergie roste, až dosáhne svého maxima ve stavu dynamické rovnováhy s prostředím.

Hodnota energického obsahu ekosystému v tomto stavu je dána omezeními vyplývajícími z dostupnosti zdrojů na stanovišti (srovnej: poušť a tropické lesy).

Výše uvedená fakta je možno vyjádřit jako:

Pro evoluci ekosystému, která začíná v iniciálním stádiu primární sukcese v čase t_0 a končí dosažením „ideálního“ klimaxu platí

$$\frac{d_e Ex}{dt} > 0$$

v klimaxu platí:

$$Ex \rightarrow \max$$

Princip maximální tvorby a disipace entropie (MEP) tvrdí, že ve stádiu klimaxu je disipace (rozptýlení) entropie z ekosystému do prostředí maximální.

Podobně jako u Bénardovy buňky se předpokládá, že stav nejvyšší disipace entropie do prostředí odpovídá stavu s nejvyšším stupněm organizace příslušného ekosystému.

Stav dynamické rovnováhy zde tedy odpovídá největší možné udržitelné vzdálenosti ekosystému od termodynamické rovnováhy.

Je třeba si uvědomit, že v ekosystému se kombinují dva procesy: udržování a regenerace stávající struktury, což je spojeno s disipací „nízkoexergické“ energie do prostředí a růst struktur nových, což je spojeno rovněž s disipací „nízkoexergické“ energie do prostředí ale také se zvyšováním exergie ekosystému.

Tyto dva procesy se dají označit jako: tok energie systémem a ukládání energie do systému.

Tyto procesy jsou ovšem provázány a spojeny s jednotlivými fázemi růstu ekosystému.

Pokud bychom se dívali na ekosystém pouze ze strany pohledu **PMEx**, potom pokles energie disipované z ekosystému do prostředí při současném zachování stávající hladiny energetického vstupu do ekosystému z prostředí (ze slunce), umožní větší část exergie uchovat v ekosystému.

Pokud bychom se dívali na ekosystém pouze ze strany pohledu **MEP**, potom vyšší disipace energie do prostředí souvisí s vyšším tokem energie přes systém.

Je tedy maximalizován tok užitečné energie nebo její ukládání?

Na první pohled vede zvyšování efektivity využívání zdrojů k poklesu disipace, ovšem pokud umožní nárůst uskladněné exergie, zvýší se i „udržovací“ disipace a jsou tedy „uspokojeny“ obě sady parametrů popisujících cíl evoluce: ty, jež „vidí“ cíl v maximální disipaci i ty, co vidí cíl v maximální „uskladněné“ exergii.

Exergie ve větší vzdálenosti od termodynamické rovnováhy (pro zájemce)

Pokud se pohybujeme v blízkosti termodynamické rovnováhy R_t , můžeme předpokládat lineární chování, potom je

$$|\delta A_{\max}| = d\delta Ex$$

přičemž s tím, jak se systém pohybuje v blízkosti termodynamické rovnováhy je změna exergie při přechodu ze stavu R_t do stavu NR_1 a do dalších stavů NR_n , které jsou od sebe stejně vzdáleny vždy stejná.

Pokud se přechod mezi stavy odehrává vždy za stejný čas dt , můžeme psát:

$$\frac{d(Ex)}{dt} = C$$

Kde C je konstanta.

Potom například pokud prostředí koná na systému „chemickou“ práci změnou počtu částic proti gradientu chemických potenciálů a systém se posouvá ze stavu termodynamické rovnováhy, můžeme pro blízkost rovnováhy psát:

$$\frac{d(Ex)}{dt} = d(Ex) = \sum_{i=1}^n (\mu_i - \mu_i^0) dN_i$$

Což je vztah, který jsme již použili.

Ovšem dále od rovnováhy tato situace neplatí, během přechodu systému mezi jednotlivými NR mezistavy se již systém nechová lineárně a za infinitesimální změnu času dt může být mezi jednotlivými mezistavy NR změna počtu částic dN různá.

To samé platí i pro změnu exergie dEx , rovnici () tedy musíme zobecnit s ohledem na možnou nelinearitu:

$$\frac{d(Ex)}{dt} = \sum_{i=1}^n (\mu_i - \mu_i^0) \frac{dN_i}{dt}$$

Vzhledem k tomu, že chemický potenciál se dá vyjádřit jako:

$$\mu = \mu_i(0) + RT \ln N_i$$

a tedy:

$$\frac{d(Ex)}{dt} = RT_0 \sum_{i=1}^n \ln \frac{N_i}{N_i^0} \frac{dN_i}{dt}$$

Řešení této rovnice je

$$Ex(t) = RT_0 \sum_{i=1}^n \left[N_i \ln \frac{N_i}{N_i^0} - (N_i - N_i^0) \right]$$

Vidíme, že $Ex(t) > 0$, pro každé $N_i > 0$ s výjimkou $N_i = 0$

Zjednodušením rovnice (), za podmínky, že $|dN_i| \ll N_i^0$ dostáváme:

$$d(Ex) = \sum_{i=1}^n \frac{(dN_i)^2}{N_i^0} \geq 0$$

Z těchto rovnic vyplývají velmi důležité závěry:

Posun dále od termodynamické rovnováhy je vždy spjat s akumulací exergie v systému

Tento stav platí i dále od termodynamické rovnováhy.

Uvažujme dále dva typy dynamiky:

Mějme systém nacházející se ve stacionárním stavu, přičemž tento stacionární stav je jediný. Uvažujme jistý proces působící na systém, v tom smyslu, že provádí na systému jistou práci. Během tohoto procesu se systém přemístí ze stacionárního stavu \mathbf{c}^0 představující stav dynamické rovnováhy s prostředím do nového stavu \mathbf{c} . Uvažujme, že přesun systému do stavu o jiných hodnotách termodynamických veličin je takového rozsahu, že nedojde ke zrušení původní rovnováhy. Pokud uvažujeme „difúzní“ či chemickou práci projevující se ve změně koncentrace i -té složky c_i , potom je tato práce rovna:

$$\begin{aligned} \text{Diss}(\mathbf{c}^0 \rightarrow \mathbf{c}) &= RT_0 \int_{t_0}^t \sum_{i=1}^n \ln \frac{c_i^0}{c_i} \frac{dc_i}{dt} dt = RT_0 \sum_{i=1}^n \int_{c_i^0}^{c_i} \ln \frac{c_i^0}{c_i} dc_i \\ &= -RT_0 \sum_{i=1}^n \left[c_i \ln \frac{c_i}{c_i^0} - (c_i - c_i^0) \right] < 0. \end{aligned}$$

Hodnota této funkce odpovídá afinitě difúzního procesu přemísťující látku z prostředí do systému nebo afinitě chemické reakce měnící příslušnou koncentraci.

Jelikož, jak již bylo řečeno, jedná se o děj hnaný, odebírá z procesu, který jej pohání volnou energii a entropie otevřeného systému se snižuje, zatímco entropie prostředí roste.

V systému se tedy vlivem vnějšího hnaného procesu naakumulovala exergie:

$$Ex(\mathbf{c}(t), \mathbf{c}^0) = -Diss(\mathbf{c}^0 \rightarrow \mathbf{c}(t))$$

Uvažujeme nyní, že externí proces, který hnal systém ze stacionárního stavu, zanikl a původní rovnováha zůstala zachována coby atraktor, potom během určitého času nastane návrat systému zpět, při čemž je do prostředí uvolněna energie rovná exergii naakumulované v systému během přechodu ($\mathbf{c}^0 \rightarrow \mathbf{c}(t)$).

Pro uvolněnou energii tedy platí:

$$|Diss(\mathbf{c}^0 \rightarrow \mathbf{c}(t))| = Diss(\mathbf{c} \rightarrow \mathbf{c}^0(t)) = -Ex(\mathbf{c}(t), \mathbf{c}^0)$$

Původního stacionárního stavu bude dosaženo, otázkou je za jaký čas, přesun zpět do rovnováhy může trvat velmi dlouho a proces proto probíhá v neurčitým čase.

Proto i při výpočtu energie uvolněné při přechodu do původní rovnováhy budou v příslušné rovnici vystupovat jako meze integrálu koncentrace c_i^0 a c_i . Rovnice potom nabyde zcela shodného tvaru s rovnicí popisující exergii předanou systému při přechodu $\mathbf{c}^0 \rightarrow \mathbf{c}$.

Uvažujme nyní druhý důležitý případ zdůrazňující vztah prostředí a systému. Systém se opět nachází ve stacionárním stavu \mathbf{c}^0 , tedy ve stavu dynamické rovnováhy se svým prostředím. Tentokrát ovšem dojde k velmi rychlé změně prostředí v tom smyslu, že stav \mathbf{c}^0 již není stabilní a vývoj systému je řízen novým atraktorem, totiž novým stacionárním stavem \mathbf{c}^1 .

Práce byla provedena na prostředí, které se změnilo, proto je přechod systému $\mathbf{c}^0 \rightarrow \mathbf{c}^1$ spontánní a je disipována energie:

$$Diss_1(\mathbf{c}^0 \rightarrow \mathbf{c}^1) = RT_0 \int_{t_0}^{\infty} \sum_{i=1}^n \ln \frac{c_i}{c_i^1} \frac{dc_i}{dt} dt = -RT_0 \sum_{i=1}^n \left[c_i^0 \ln \frac{c_i^0}{c_i^1} - (c_i^0 - c_i^1) \right].$$

Uvažujme, že dosažení nového stacionárního stavu se uskuteční za určitý čas.

Dále nastane taková změna prostředí, která způsobí opětovný spontánní návrat systému do původního stacionárního stavu, tedy nastane přechod $\mathbf{c}^0 \rightarrow \mathbf{c}^1$.

Energii uvolněnou v tomto případě popisuje rovnice (1).

Druhý případ představuje vhodný most mezi exergií a stabilitou živých systémů.

V tomto případě uvažujeme stabilitu ve formě rezistence.

Jistá změna podmínek prostředí, vyvolaná například člověkem, může živý systém zabít.

Pokud znamená přechod $\mathbf{c}^0 \rightarrow \mathbf{c}^1$ dosažení stavu, který povede právě k rozbití příslušného živého systému/ ekosystému, potom je exergie uvolněná při přechodu $\mathbf{c}^0 \rightarrow \mathbf{c}^1$ minimální prací, která musí být pro tuto transformaci vykonána.

Jak rozebereme později, některé děje v přírodě mají skokový charakter, proto pokud je \mathbf{Ex}_d hodnota exergie nutná pro zabití živého systému, pak hodnota $\mathbf{Ex}_d - \delta \mathbf{Ex}$ kde $\delta \mathbf{Ex} > 0$, značí množství entropie-prosté práce vykonané na prostředí, ještě nepovede k zániku organismu/ekosystému.

Hodnoty \mathbf{Ex}_d mohou být tedy měřítkem rezistence různých ekosystémů/ živých organismů.

Uvažujme příklad chemického znečištění působícího na daný ekosystém, pokud je c^n požadovaná koncentrace polutantu a c^m , koncentrace v prostředí, která povede k zániku ekosystému, potom exergie příslušného živého systému, vztaženo na jednotku objemu je rovna:

$$\mathbf{Ex}_d = RT (c^m \ln c^m/c^n - (c^m - c^n))$$

Srovnáním rovnic pro disipaci energie pro případ $\mathbf{c}^0 \rightarrow \mathbf{c}^1$ a pro případ $\mathbf{c}^1 \rightarrow \mathbf{c}^0$ zjistíme, že v případě dynamiky řízené změnou prostředí se obě rovnice liší, což je způsobeno tím, že v tomto případě se objevuje nová rovnováha, vzdálená od původního výchozího stavu.

Tento případ je charakteristický pro nelineární děje, s nimiž jsou spjaty velmi zajímavé jevy (viz dále).

V případě dynamiky řízené změnou prostředí je tedy uzavření cyklu $\mathbf{c}^0 \rightarrow \mathbf{c}^1 / \mathbf{c}^1 \rightarrow \mathbf{c}^0$ neúplné a v systému zůstává jistá exergie:

$$\delta \mathbf{Ex} = \mathbf{Ex}(\mathbf{c}^0, \mathbf{c}^1) - \mathbf{Ex}(\mathbf{c}^1, \mathbf{c}^0) = RT_0 \sum_{i=1}^n \left[(c_i^1 + c_i^0) \ln \frac{c_i^1}{c_i^0} - 2(c_i^1 - c_i^0) \right]$$

Tento zbytek exergie může být kladný nebo záporný.

Pokud je zbytek kladný, má systém schopnost se vyvíjet!

Pokud je kladný a dochází k opakovaným výchylkám prostředí, systém prochází evolucí, během níž ukládá exergii.

Tento fenomén dokáže popsat evoluci reálných ekosystémů v průběhu procesu jejich adaptace podmínkám „mírně“ a kontinuálně se měnícího prostředí, ve kterém dochází k jemným oscilacím okolo jisté „hladce“ se měnící křivky.

Tento fenomén se může uplatnit až ve větší vzdálenosti od termodynamické rovnováhy.

Z prvního typu dynamiky taková možnost evoluce nevyplývá. První případ si můžeme představit, tak, že systém je uzavřený a následně se stává na čas systémem otevřeným, během tohoto intervalu dojde k vykonání práce na systému.

Takový způsob popisu známe z klasické termodynamiky.

Možnost evoluce systému se objevila až ve chvíli, kdy jsme operovali s otevřeným systémem, který je po celou dobu své existence těsně provázán se svým prostředím.

Nárůst exergie během evoluce může mít různé biologické interpretace. Na úrovni jednotlivých organismů se například může jednat o genetickou informaci, která se zachovává i po smrti organismu a její uchování je nutné pro nástup další generace (zahájení nového cyklu).

Musíme mít na zřeteli, že pokud změna prostředí překročí rezistenci organismu/ekosystému, může dojít k rozpadu systému, čímž se zastaví (alespoň na čas) i evoluce organismu/systému.

Během tohoto procesu pochopitelně roste entropie prostředí.