



Centrum pro výzkum
toxických látek
v prostředí

Stabilita a chaos v ekologii

**Inovace a rozšíření výuky zaměřené
na problematiku životního prostředí na PŘF
MU (CZ.1.07/2.2.00/15.0213) spolufinancován
Evropským sociálním fondem a státním
rozpočtem
České republiky**

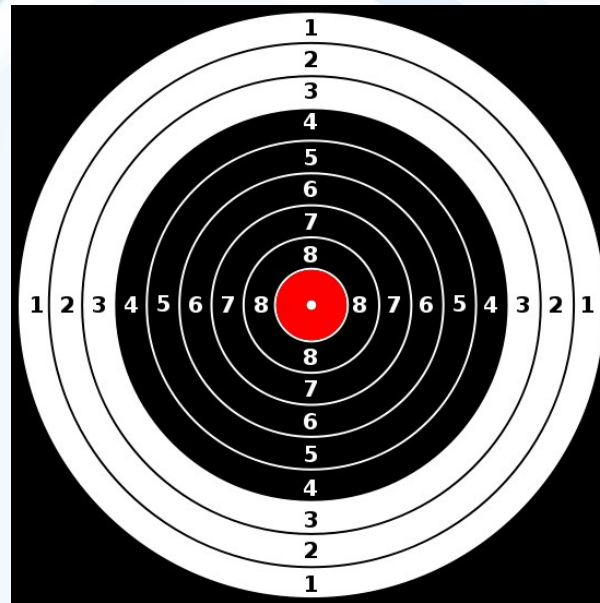


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Centrum pro výzkum
toxických látek
v prostředí

Quo vadis ecosystems?



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Definice:

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

Energie, 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

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

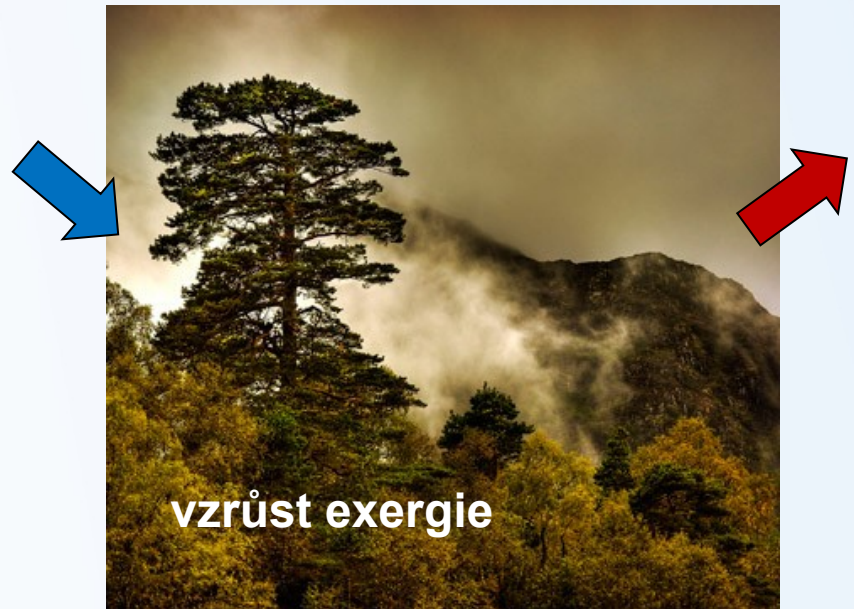
Exergie, je maximálním množstvím energie, která může být získána ze systému, jeho převedení do stavu rovnováhy s prostředím, pod podmínkou, že supersystém: prostředí + systém je uzavřený. Bývá nazývána také volnou energií

Růst ekosystému

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

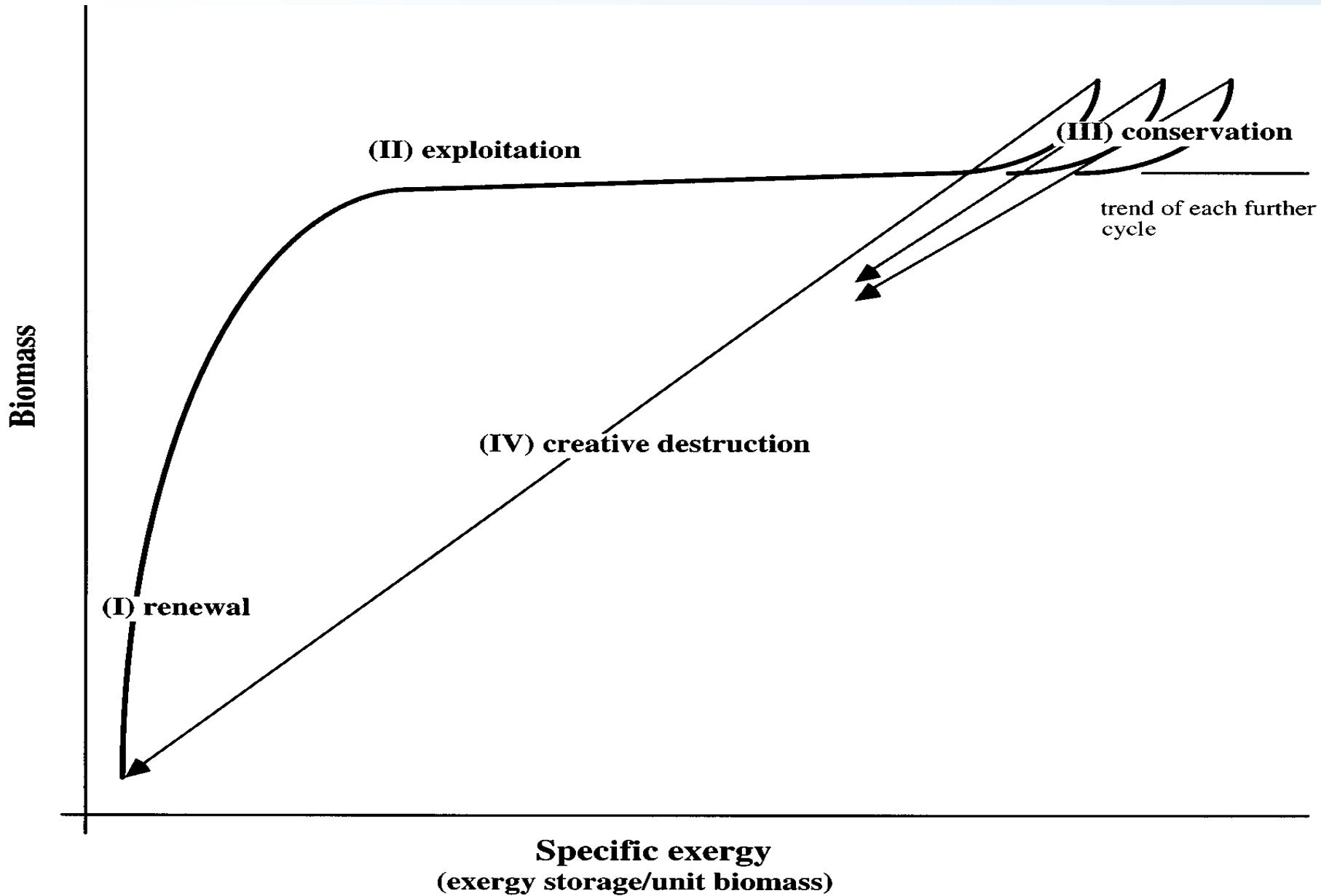
růst informačního obsahu, zvyšování genetické a biologické diverzity, růst specializace v rámci ekosystému: posun od r-strategie ke K-strategii, takovíto živočichové produkují méně „odpadních produktů a nesou v sobě více informace



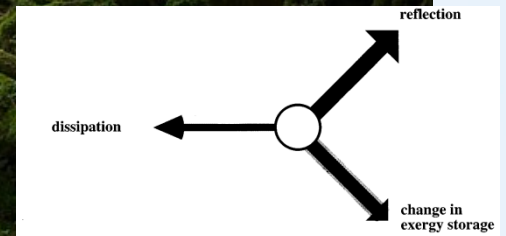
FAR FAR AWAY

- **biomasa ekosystému roste**
- **změna počtu zpětných vazeb: během progresivní evoluce nárůst**
- **nárůst respirace**
- **respirace vzhledem k biomase klesá**
- **specifická produkce entropie, vzhledem k biomase, klesá**
- **celková produkce entropie stoupá a nakonec se ustálí na stálé úrovni**
- **množství informace vzrůstá (více druhů, druhy s větším počtem genů, biochemie se více diverzifikuje)**

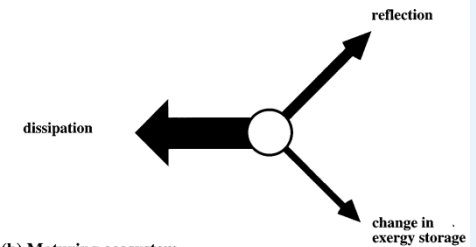




Který proces patří ke které fázi?



(a) Early stage ecosystem



(b) Maturing ecosystem



Jak popsat stav a směřování ekosystémů?

Naším cílem je 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



Ascendance

*ekosystém: síť
vztahů*

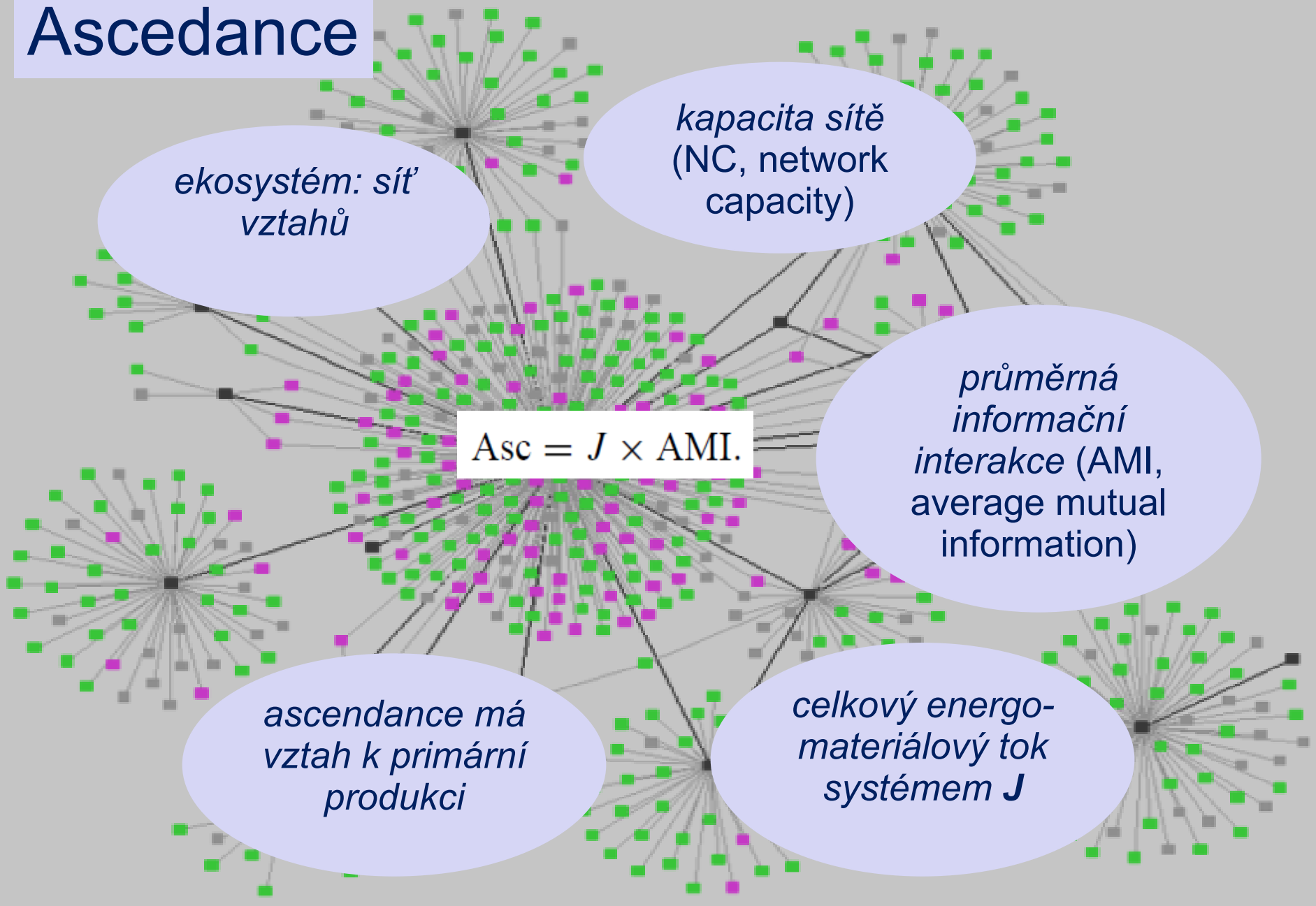
*kapacita sítě
(NC, network
capacity)*

$$\text{Asc} = J \times \text{AMI.}$$

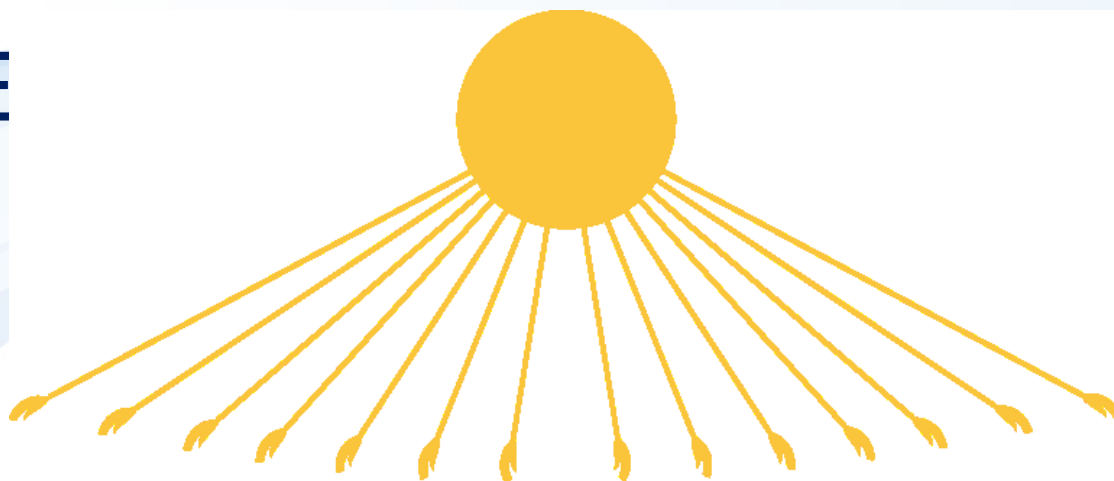
*průměrná
informační
interakce (AMI,
average mutual
information)*

*ascendance má
vztah k primární
produkci*

*celkový energo-
materiálový tok
systémem J*



E



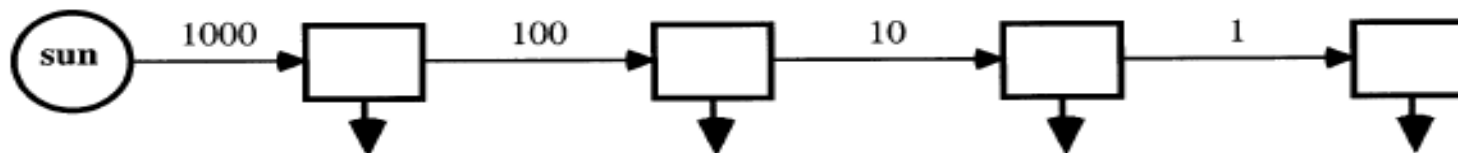
$$E_m = \sum_{i=1}^N \text{Tr}_i J_i$$

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

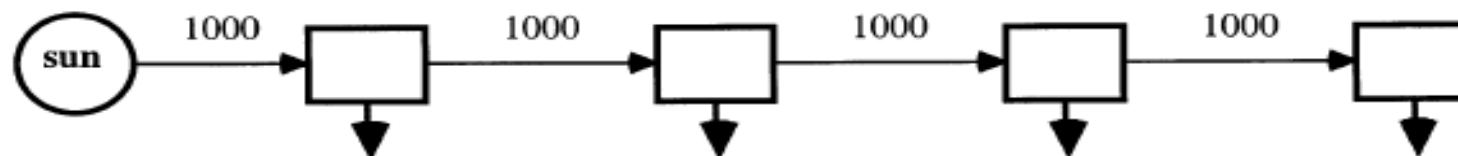
Energie je extenzivní stavovou veličinou a udává, kolik sluneční energie je třeba pro výstavbu různých „typů“ biomasy.



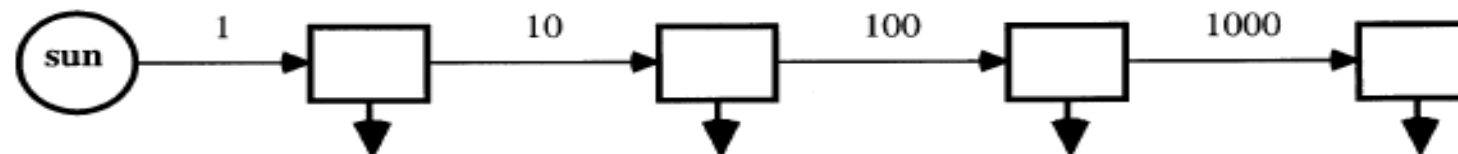
Energy flow ($\text{kJ/m}^2 \text{ h}$)



Solar equivalents ($\text{kJ/m}^2 \text{ h}$)



Embodied energy (transformity) = solar energy equivalents ($\text{kEmj/m}^2 \text{ h}$)



Supply – demand indicator

1. bylo empiricky zjištěno, že rychlost metabolických procesů v ekosystémech je funkcí jejich hmotnosti (biomasy)

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

tedy rychlost metabolismu s rostoucí hmotností klesá

2. ekosystém může být popsán sítí objektů a toků

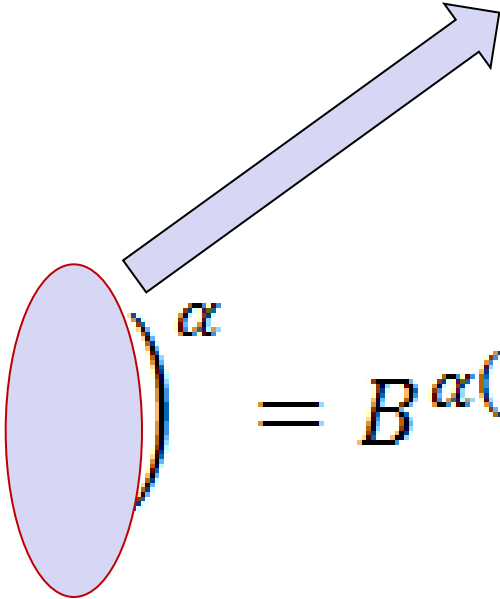


jedinec

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

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

ekosystém


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

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

Exergie

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

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

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.

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



Bilance exergie ekosystému

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

$$dEx = d_i Ex + d_e Ex$$

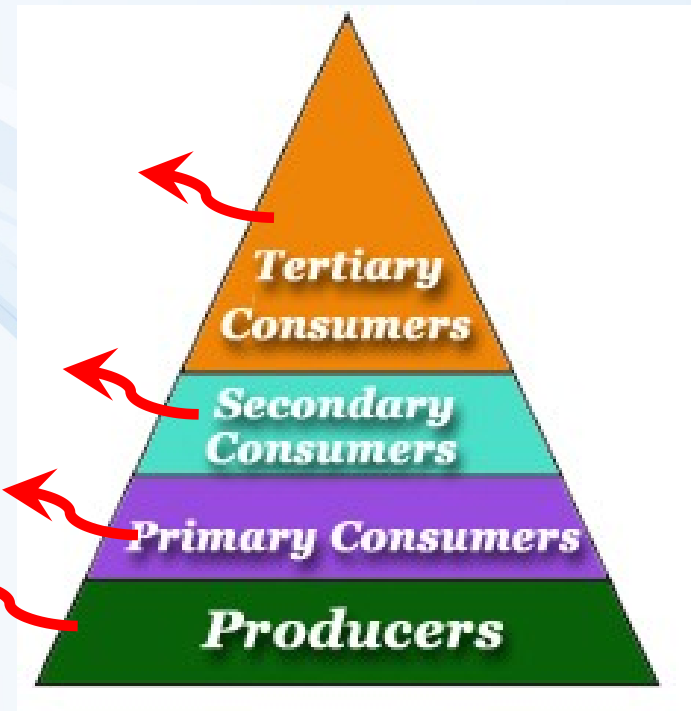
$$d_i Ex/dt < 0$$

$$d_e Ex/dt > 0$$

pokud je $|d_i Ex/dt| < d_e Ex/dt$

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

Q



Jak lze vyčíslit exergii ekosystému?

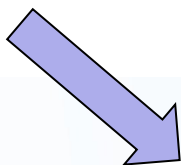
pro ekosystém:

- energie biomasy
- energie informačního obsahu
- energie komplexity sítě vztahů



pro biomasu

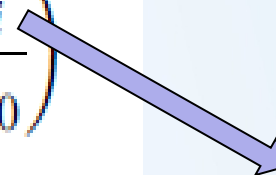
$$Ex = \sum_c (\mu_c - \mu_{c0}) N_i$$



pamatujete na Gibbsovu rovnici?

$$dU = TdS - pdV + \sum \mu_m dn_m$$

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



můžeme aproximovat celkovým množstvím biomasy v ekosystému

Energetická cena informačního obsahu živého systému ?

živá žába o hmotnosti 20g:
257 MJ

mrtvá žába o hmotnosti 20g:
374 kJ

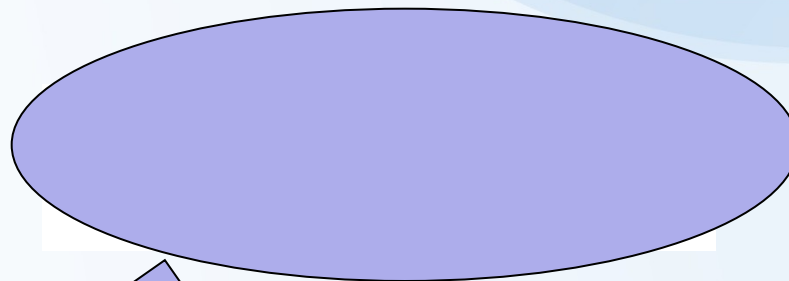
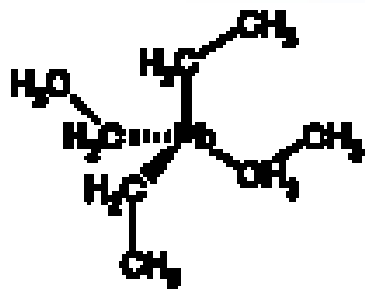


$$Ex = AR^2 \left(\frac{A}{A_0} \right) - A \ln \left(\frac{A}{A_0} \right)$$

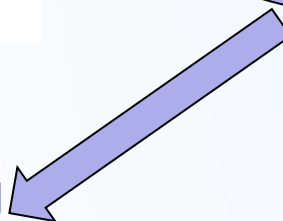
Výraz je znám z teorie informace, informačního vyjádření entropie, ale stejnou **formu** zápisu má třeba i Shannonův-Weaverův index pro biodiverzitu.

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.



ztráta exergie v důsledku
chemické-difúzní
kontaminace



V souvislosti s přidáváním tetraethylolova do benzínu, bylo v průměru **ročně** uvolněno do ovzduší **400 000 t** tohoto toxického kovu.

Průměrná koncentrace Pb v rudě je **0,05 kg Pb/kg horniny**.

Průměrná koncentrace Pb v současném znečištěném prostředí je **1 µg/kg půdy**.

Molární hmotnost Pb je **207 g/mol**, uvažujeme teplotu **300 K**.

Jaký je hrubý odhad ztráty exergie globálního ekosystému v souvislosti s tímto znečištěním?



Jaká je roční ztráta exergie v globálním ekosystému vlivem vstupů olova z benzínu?

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

Pb 85000 GJ/rok



23611300 kWh \approx 23,6 GWh

To odpovídá energii, jakou lze v průměru získat spálením 55000 tun hnědého uhlí.

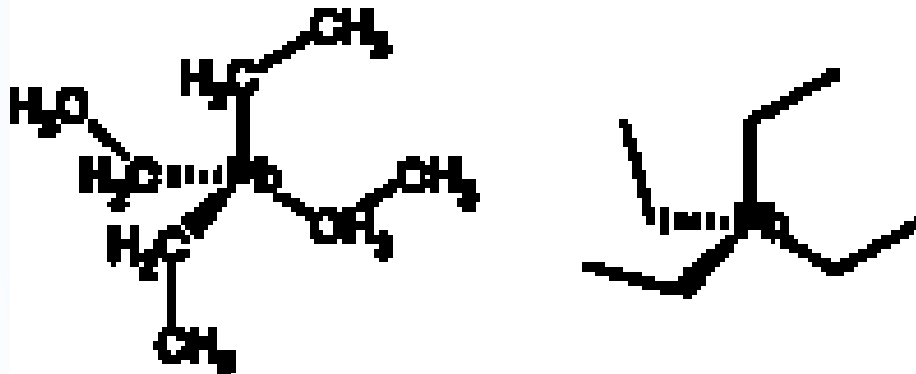
Cr 32000

Ni 15000

Zn 80000

Cu 18000

Hg 27000



Čtvrtý zákon termodynamiky

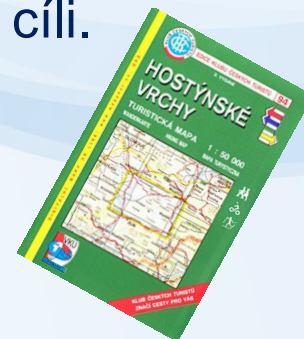
Pokud pozorujeme evoluci nebo sukcesi ekosystému, vidíme spění ke stále větší komplexnosti a tendenci využít ekologických nik v maximální možné míře.



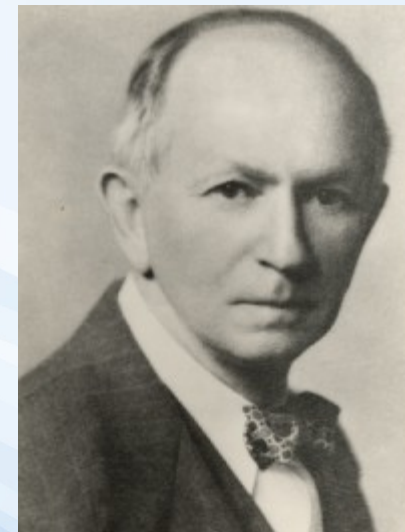
Zdá se tedy, že živé systémy směřují samovolně k jistému cíli.

Chceme pochopit toto směřování:

- musíme cíl jasně určit (pomocí měřitelných veličin)
- jaké jsou cesty k cíli?
- proč právě tento cíl?

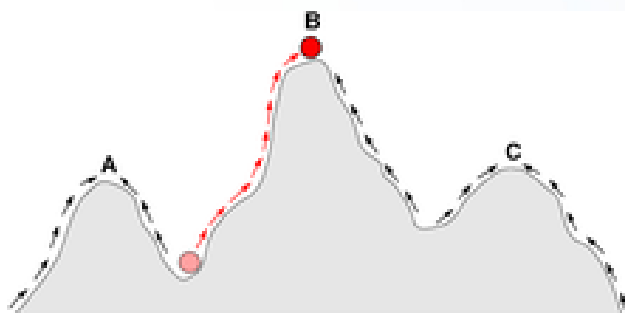


jedním z prvních, kdo se pokusil popisovat evoluci živých systémů pomocí parametrů spjatých energetickou interakcí systém-prostředí, byl **Alfred James Lotka** (March 2, 1880 – December 5, 1949)



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

díky nápadnému spojení tohoto principu s Darwinovým konceptem fitness, bývá tento princip nazýván Lotka-Darwinovým principem



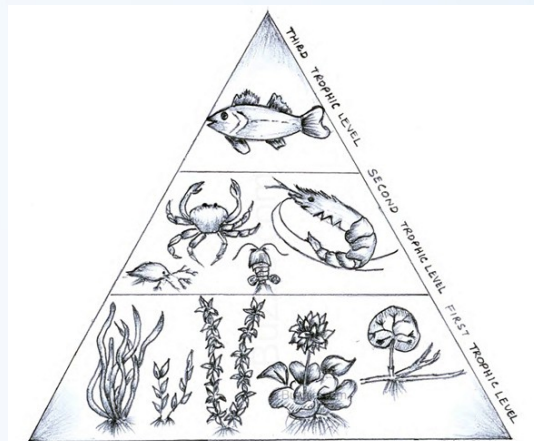
Lotka ve své práci hovoří o volné (dostupné) energii v souladu s Gibbsovou definicí a odvolává se Boltzmanovu práci:

*„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**”*

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



Možné formulace „4. zákona termodynamiky“

- 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)
- maximum ascendancy (Ulanowicz, 1980)



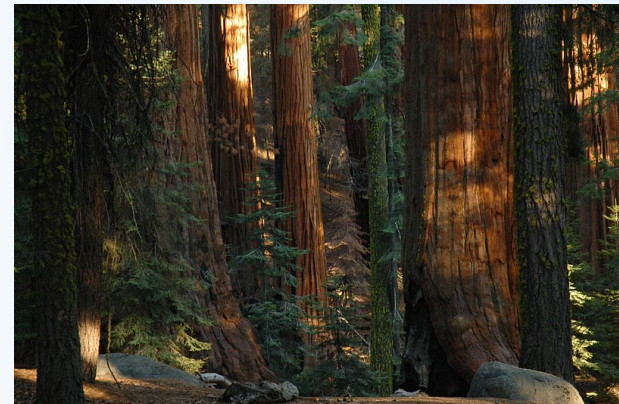
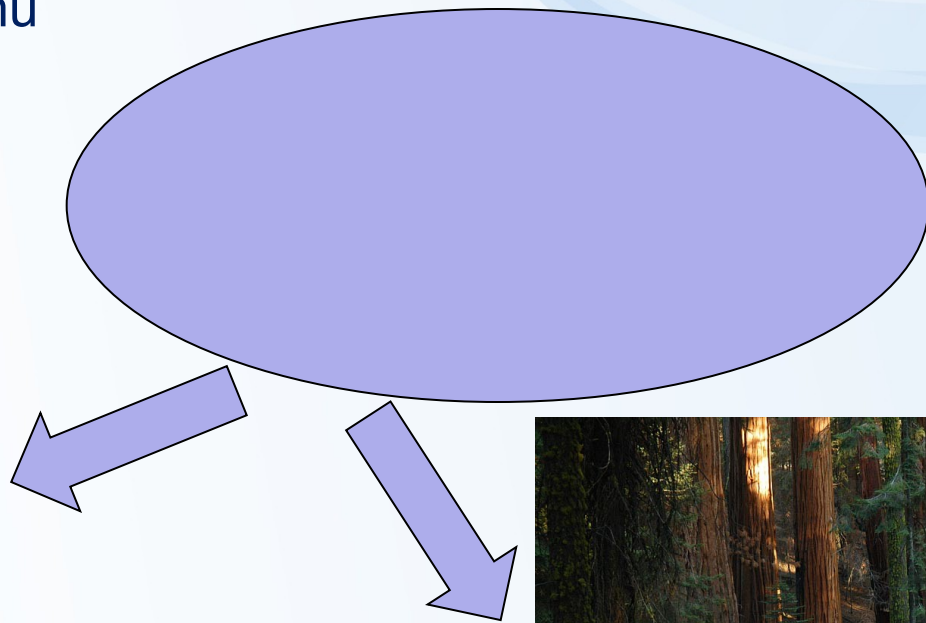
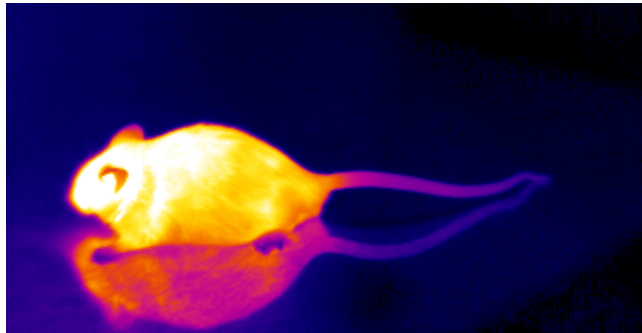
některé tyto principy lze spojit se snadno měřitelnými veličinami v ekosystémech, například: exergie: udržitelná biomasa, produkce entropie: intenzita metabolismu, buď celého systému, nebo vztažena na jednotku hmoty (specifická entropie), ascendancy: primární produkce

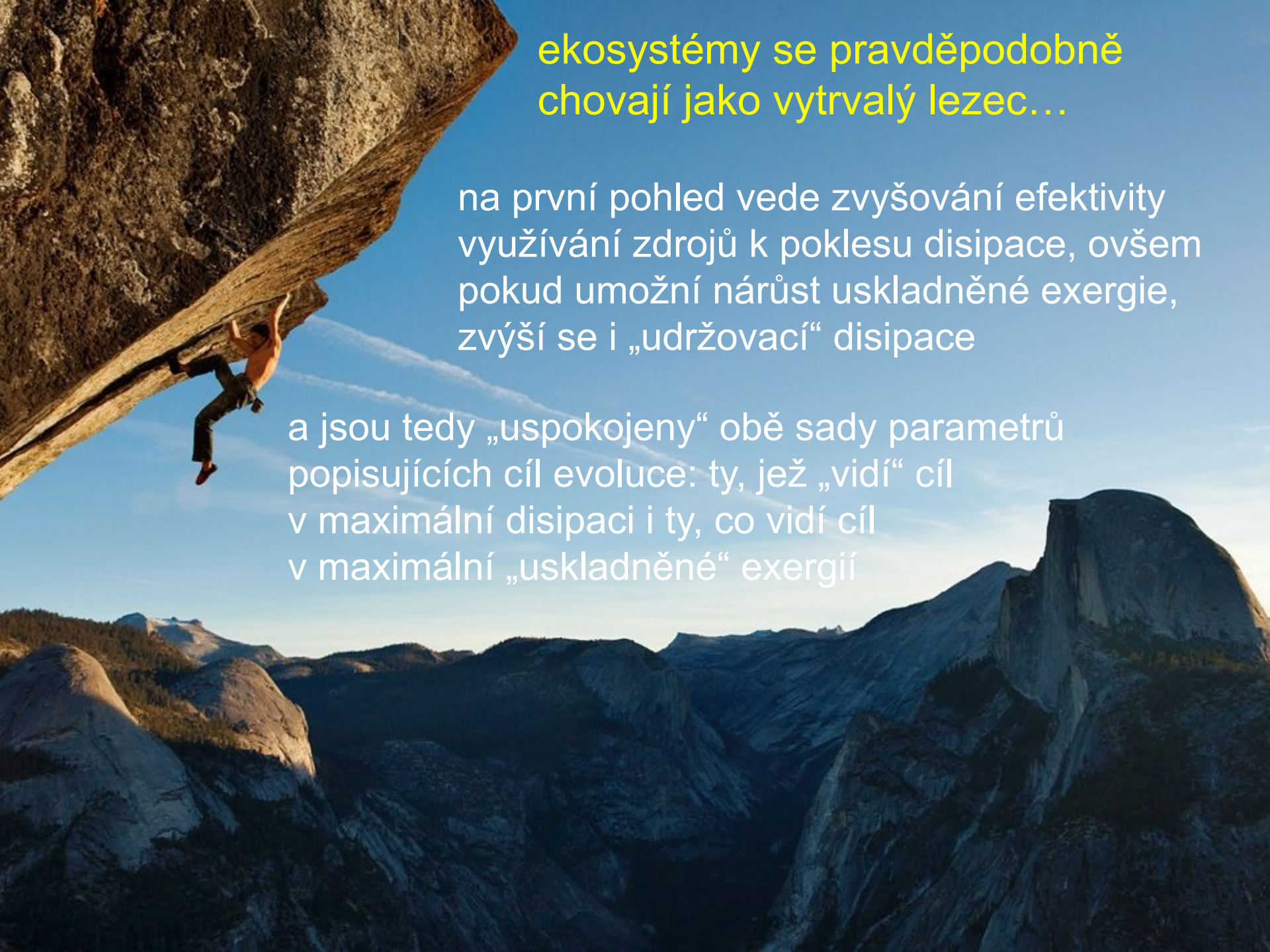
Disipace a ukládání volné energie jako hlavní inspirace formulace „4. zákona termodynamiky“

v ekosystému se kombinují dva procesy:

1. udržování a regenerace stávající struktury
2. růst struktur nových

tyto dva procesy se dají označit jako: tok energie systémem a ukládání užitečné energie do systému



A photograph of a person climbing a large, overhanging rock formation. The climber is shirtless and wearing dark pants, positioned on the left side of the frame. The rock is a light brown color and has a rough, textured surface. The background is a clear blue sky with some light clouds. The overall scene is set in a mountainous area with other rock formations visible in the distance.

ekosystémy se pravděpodobně chovají jako vytrvalý lezec...

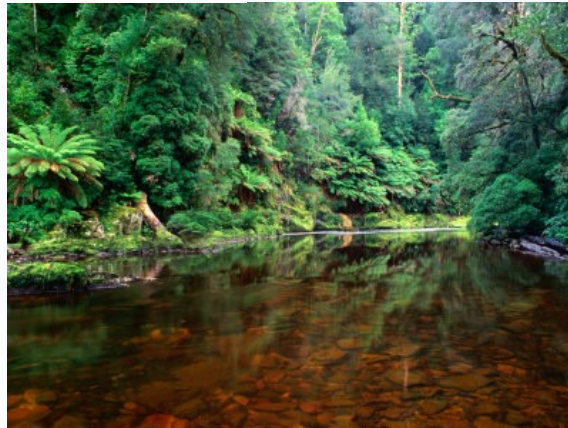
na první pohled vede zvyšování efektivity využívání zdrojů k poklesu disipace, ovšem pokud umožní nárůst uskladněné exergie, zvýší se i „udržovací“ disipace

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“ exergií

Vysvětlení následujících pozorovaných jevů z hlediska předešle uvedených principů (nebo jiná originální vysvětlení...:-)

- ve vyšších zeměpisných šířkách je menší biodiverzita a ekosystémy mají jednodušší strukturu
- snížení druhové bohatosti ekosystémů zapříčiňuje oslabení některých procesů a nižší úroveň primární produkce
- naopak byl pozorován nárůst čisté produkce v souvislosti s homogennějším rozložením druhů v ekosystému

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



- proudy v mořských ekosystémech snižují dopady konkurence a predace a způsobují lokální vzrůst biodiverzity
- v prostředí s nenaplněnou kapacitou (volnými nikami) jsou upřednostňováni r-stratégové
- na příkladu 33 jezer se ukázalo, že vyšší úroveň ukládání exergie na úrovni primárních producentů umožňuje vyšší zisky exergie i v dalších trofických úrovních ekosystému, ovšem pokud byl jezerní ekosystém zatížen náhlou, antropogenní eutrofizací, ekosystém se posunul blíže k termodynamické rovnováze





Gaia, Alex Grey, 1989, oil on linen, 96 x 144 inches