

## ***Obecné charakteristiky dynamické rovnováhy a mechanismy jejího ustalování***

Pro začátek několik obecných pojmů

*Rovnovážný stav* - nejpravděpodobnějšímu uspořádání systému, do kterého systém dospěje po určité konečné době, izolujeme-li jej od jeho okolí. Rovnovážný stav je plně popsán všemi nezávislými vnějšími parametry vyjadřující působení na systém a alespoň jedním parametrem vnitřním (např. teplotou). Všechny ostatní vnitřní parametry je potom možno odvodit ze znalosti vnějších parametrů a zvolených vnitřních parametrů pomocí stavových rovnic.

*Nerovnovážné stavy* - stavy termodynamického systému mimo stav rovnováhy. Uzavřené a otevřené systémy se obvykle nacházejí v nerovnovážných stavech v důsledku své neustálé interakce s vnějším prostředím.

*Stacionární stav* – v tomto stavu jsou všechny stavové veličiny systému nezávislé na čase, tj. systém se s časem nemění. Na rozdíl od rovnovážného stavu stacionární stav může nastat též u uzavřených a otevřených systémů v procesu výměny energie, případně částic s okolím.

V tomto případě je stacionární stav výsledkem již dříve zmíněné dynamické rovnováhy.

Podstata stability jakéhokoliv otevřeného systému není tedy v jeho neměnném stavu (bez toků látek, energie a informace), ale v jeho schopnosti udržovat vlastní dynamickou rovnováhu, tj. udržovat se pomocí vnitřních procesů ve stavu bez podstatných změn své vnitřní struktury.

Vidíme tedy, že pojmy stacionární/dynamický, často chápané jako protichůdné se u živých systémů vodně doplňují v tom smyslu, že udržení stacionárnosti vnitřní struktury systému je umožněno výměnou látek, energie a informace systému s prostředím, tedy dynamickými ději.

Stacionární stav dynamického systému je schopen „unést“ i značně kolísající podmínky vnějšího prostředí, v tomto případě hovoříme o rezistenci systému neboli vnitřní kapacitě systému odolávat externím změnám.

Pokud dojde k vychýlení systému z jeho stacionárního stavu udržovaného pomocí dynamické rovnováhy, v důsledku externího tlaku, vykazují některé systémy navracet po odeznění vnějšího tlaku do původního stavu. Rychlost tohoto návratu je další veličinou spojovanou s ekologickou stabilitou a bývá spojována s resiliencí.

Pojmům rezistence a resilience, které lze označit jako rub a líc ekologické stability a které jsou aplikovány především v souvislosti s ekosystémy bude ještě v dalších přednáškách věnována zvláštní pozornost.

Při popisu ekologických systémů se setkáváme i s dalšími typy stability, pro názornost uvádíme přehled základních definic stability používaných v souvislosti s ekologickými systémy:

***Resilience*** rychlost s jakou se systém vrátí do jeho výchozího stavu po působení disturbance (Webster et al. 1974). Používá se pro systémy ve stacionárním stavu nebo pro systémy navracející se na nerovnovážné vývojové trajektorie.

**Rezistence** schopnost systému udržovat jeho výchozí stav při působení vnějších rušivých sil (Harrison 1979). Používá se pro stacionární stavy.

**Robustnost** množství disturbancí, které systém toleruje, než se přesune (přepne) do jiného stavu. Úzce spjata k konceptem ekologické residence podle Hollinga (1973). Aplikovatelná na stacionární i nerovnovážné systémy.

**Variabilita** měření změn v systému v čase. Fenomenologické měření, které nečiní žádné předpoklady o existenci stacionárního stavu nebo jiných asymptotických trajektorií (Loreau 2010).

**Gradience (amplification envelope)** popisuje, jak je počáteční perturbace ze stacionárního stavu zesílena v rámci systému (Neubert and Caswell 1997).

**Persistence** schopnost systému udržovat sebe sama v průběhu času. Často používaná pro nerovnovážné systémy nebo systémy před zánikem (Loreau 2010).

Vzhledem k výše popsané schopnosti živých systémů udržovat stacionární stav pomocí dynamické rovnováhy i při měnících se externích podmínkách je zřejmé, že musíme předpokládat existenci nějakého vnitřního mechanismu, který účinky odchylek vnějšího prostředí zeslabuje nebo zcela ruší.

### ***Mechanismy ustalování dynamické rovnováhy***

Jelikož udržování otevřených systémů ve stacionárním stavu a tedy jejich stabilita je dějem aktivním, na rozdíl od termodynamické rovnováhy rovnovážných struktur, je třeba vidět za stabilitou živých systémů jisté procesy.

Tyto systémy tedy vykazují jistou schopnost autoregulace.

Nejdůležitějšími regulačními mechanismy v systémech jsou zpětné vazby, což platí zcela obecně pro všechny typy systémů.

Systematikou analýzu zpětných vazeb přinesla kybernetika. Kybernetika je věda o komunikaci a řízení, jejíž základy položili v období po 2. světové válce především John von Neuman a Norbert Wiener.

Wiener definoval kybernetiku jako vědu o „řízení a komunikaci v živočichu a ve stroji“.

Wiener je i autorem slova kybernetika, které má svůj původ v řeckém slově kybernetes – kormidelník.

Kybernetikové se zabývali různými úrovněmi popisu: soustřeďovali se na strukturu komunikace, zejména v uzavřených smyčkách a sítích.

Jejich výzkumy je dovedly k pojmům zpětné vazby, autoregulace a později i k samoorganizace.

Právě tyto tři pojmy jsou klíčové pro stabilitu a možnost evoluce živých systémů.

Všechny hlavní výsledky kybernetiky vznikaly srovnáváním organismů a strojů, tj. na podkladě mechanistických modelů živých systémů.

Kybernetické stroje se ovšem od Descartových hodinových strojů velice liší.

Kritická odlišnost spočívá ve Wienerově konceptu zpětné vazby.

Princip zpětné vazby byl znám již dříve a dokonce aplikován v technice, často citovaným příkladem je například Wattův regulátor.

Samoregulující se stroje se zpětnovazebnými smyčkami existovaly dlouho před kybernetikou a Wattův regulátor je příkladem jednoho z nich, dalším příkladem je třeba termostat.

Přesto, že byla dvě výše uvedená zařízení hojně používána v průběhu 19. století a známý fyzik James Clerk Maxwell například vypracoval formální matematickou analýzu Wattova parního regulátoru, trvalo téměř další století, než kybernetikové rozpracovali pojem zpětnovazebné smyčky a cirkulární kauzality, který je pro pochopení principu fungování těchto zařízení klíčový.

Jedním z nejjednodušších příkladů zpětnovazebné smyčky je Wienerův původní příklad kormidelníka.

Když se loď řízená kormidelníkem odchyluje od stanoveného kurzu, řekněme vpravo, kormidelník určí odchylku a potom vrací směr pohybem kormidla vlevo.

Tím se odchylka lodi zmenšuje, až prochází místem se správnou pozicí a poté se odchýlí vlevo.

Někdy během tohoto manévru určí kormidelník novou odchylku vlevo a pootočí kormidlem vpravo atd.

Aktuální trajektorie lodi proto osciluje okolo žádaného směru. Zručnost kormidlování lodi spočívá ve schopnosti udržet tyto oscilace co nejmenší.

Tento příklad je krásnou ukázkou negativní zpětné vazby.

Obecně se dá zpětná vazba definovat jako kruhové uspořádání kauzálně spojených prvků, v němž prvotní příčina postupuje podél prvků smyčky, takže každý prvek působí na prvek následující, až poslední z nich přenese efekt na počáteční prvek cyklu a zpětná vazba se tak uzavře.

Jak již bylo naznačeno, rozlišujeme negativní zpětnou vazbu a pozitivní zpětnou vazbu.

Uvažujeme jistý systém a proces v něm, tento proces má v systému jistou odezvu, která tento proces zpětně ovlivňuje.

Pokud tato odezva vede ke gradaci procesu, který ji vyvolal, hovoříme o pozitivní zpětné vazbě, pozitivní zpětná vazba je tedy samozesilující.

Pokud odezva vede k usměrnění procesu na určitou úroveň, hovoříme o negativní zpětné vazbě, negativní zpětná vazba je tedy samovyrovňavající.

To znamená, že pozitivní zpětná vazba vede k divergenci vývoje procesu, který zapříčiňuje příslušnou odezvu od počátečního stavu, kdežto negativní zpětná vazba vede k udržování procesu na výchozí úrovni.

Pokud se přidržíme příkladu s kormidelníkem, pak negativní zpětná vazba odpovídá právě tomuto případu, kdy trajektorie lodi osciluje, kolem nějakého směru, u živých systémů tento směr reprezentuje například optimální teplota, vyvážená rychlost jednotlivých metabolických procesů v těle atd.

Pozitivní zpětná vazba by odpovídala tomu, kdyby kormidelník odchyloval loď stále více od žádoucího směru.

Zpětnovazebné smyčky pak mohou obsahovat pozitivní i negativní spojení. Dle celkového počtu negativních spojení ve smyčce pak lze rozhodnout, zda bude výsledný efekt zpětnovazebné smyčky pozitivní nebo negativní.

Vše si osvětlíme opět na příkladu kormidelníka:

Na obrázku (viz prezentace k přednášce) vidíme strukturu negativní zpětnovazebné smyčky zobrazující proces, při kterém kormidelník vede trajektorii lodi podél žádaného směru.

První část procesu stanovení odchyly – nastavení kormidla označíme znaménkem plus, jelikož se jedná o pozitivní spojení: čím větší je odchylna od předem určeného směru, tím větší je regulace směru pomocí pootočení kormidla.

Další část procesu je však negativní: čím větší je regulace odchyly pomocí kormidla, tím odchylna klesá rychleji, větší kontrolování ze strany kormidelníka tedy vede k poklesu odchyly, proto tuto část procesu označíme znaménkem mínus.

Poslední proces je opět pozitivní, s tím, jak se odchylna od určeného směru zmenšuje, bude její nově stanovená hodnota menší, tedy tento proces rovněž označíme znaménkem plus.

Je důležité si uvědomit, že znaménka + a – nevyjadřují vzestup nebo pokles hodnoty, ale vyjadřují *relativní směr změny* na sebe vázaných prvků, tedy znaménko + označuje stejný směr změny a znaménko minus směr opačný.

Takové označení je vhodné z toho důvodu, že umožňuje určit celkový charakter zpětnovazebné smyčky podle jednoduchého formálního pravidla.

Smyčka bude samovyrovňovací (negativní), pokud bude obsahovat lichý počet negativních spojení a samozesilující (pozitivní), jestliže bude obsahovat sudý počet negativních spojení.

Zpětnovazebné smyčky se často skládají jak z pozitivních, tak z negativních příčinných vazeb a jejich celkový charakter lze snadno určit prostým sčítáním negativních vazeb ve smyčce.

Wiener a jeho kolegové považovali zpětnou vazbu také za základní mechanismus autoregulace, která umožňuje živým systémům udržovat se ve stavu dynamické rovnováhy.

A skutečně zpětné vazby lze nalézt na různých stupních organizace živých systémů.

S negativní a pozitivní zpětnou vazbou v systémech souvisí exponenciální a limitovaný růst.

Představíme si základní vztahy popisující neomezený a limitovaný růst systému a při promyšlení těchto vztahů si uvědomíme některé podstatné rysy matematické redukce.

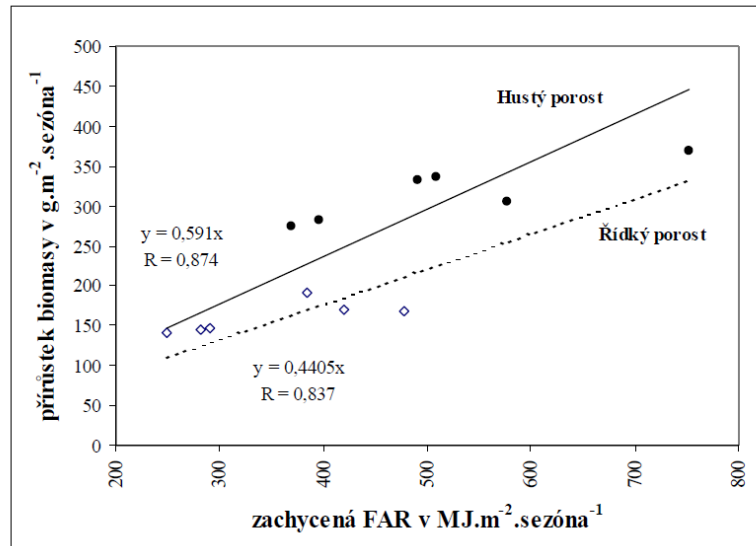
Pro pochopení fungování a evoluce složitých systémů je nutné zabývat se jejich dynamikou neboli vývojem v čase.

V živých systémech se lze setkat s lineárním chováním, v mnohých pozorovaných jevech se snažíme lineární chování nalézt, tak, aby alespoň přibližně popisovalo sledovaný problém.

Linearita je totiž popsána velmi jednoduchým vztahem mezi nezávisle a závisle proměnou:

$$y = a \cdot x + b$$

Většinou sledujeme odezvu systému ( $y$ ) na změnu jistého parametru prostředí ( $x$ ). Hodnota  $a$  v tomto případě představuje konstantu, která určuje nárůst  $y$  v závislosti na nárůstu  $x$ . Hodnota  $b$  pak určuje, kde přímka lineární závislosti protne osu  $y$ , tedy hodnotu  $y$  pro  $x = 0$ .



Příkladem vztahu popisující chování přírodního systému lineárně je Montheitova hypotéza, která dává do souvislosti lesním ekosystémem zachycenou Fotosynteticky Aktivní Radiaci a přírůstek biomasy porostu.

$$DW = \varepsilon \cdot I_i$$

kde  $DW$  značí vyprodukovanou nadzemní biomasu,  $I_i$  zachycenou FAR a  $\varepsilon$  je koeficient konverze energie slunečního záření do nadzemní biomasy.

Koeficient představuje veličinu vhodnou pro popis zdravotního stavu porostu, jelikož je typickou systémovou veličinou, jejíž hodnota odráží stav mnoha procesů uvnitř ekosystému. Má tedy vztah i ke stabilitě ekosystému.

Pro lineární chování je typický stále stejný přírůstek nezávisle proměnné, tedy například posuneme-li se na ose  $x$  vždy o jedničku kupředu, odpovídá tomuto vzestupu vždy stejný nárůst (pokles) hodnoty  $y$ .

Kontinuální změnu v matematice značíme symbolem  $d$ .

Pokud se zajímáme pouze o výchozí a konečný stav systému a změnu určujeme jako rozdíl počáteční a konečné hodnoty, mezi nimiž leží větší, než nekonečně malý interval, značíme změnu symbolem  $\Delta$ .

Jelikož je změna lineárního systému konstantní, můžeme pro časový vývoj systému ( $dt$ ) psát:

$$dy/dt = K$$

kde  $K$  je konstanta značící konstantní přírůstek.

Ovšem vrátíme-li se k příkladu pozitivní zpětné vazby, bude z jejího charakteru zřejmé, že systém řízený tímto druhem vazby se nebude chovat lineárně.

Například v ekosystému je každý druh schopen exponenciálního populačního růstu. Tyto tendence jsou však drženy „na uzdě“ rozličnými vyrovnávacími interakcemi uvnitř ekosystému. Nespoutaný exponenciální růst se objeví pouze v silně narušeném ekosystému či v jisté fázi vývoje populací (nejčastěji  $r$ -stratégů). Potom se některé rostliny promění v „plevele“ a někteří živočichové ve „škůdce“ a jiné druhy vymizí a je tak narušena rovnováha celého systému.

Již na základě těchto obecných definic je zřejmé, že negativní zpětná vazba vede ke stabilitě systému, kdežto pozitivní zpětná vazba k jeho destabilizaci.

Přesto, jak bude ukázáno v dalších přednáškách, nacházíme v přírodních systémech i pozitivní zpětné vazby.

Neregulovaný růst populace je tedy příkladem jevu s pozitivní zpětnou vazbou:

Čím více členů populace je v plodném věku, tím více potomstva může být zplozeno. Čím více potomstva dorůstá do plodného věku, tím rychleji narůstá populace.

Aktuální nárůst populace (změna velikosti populace v čase neboli  $dn/dt$ ) je tedy úměrná okamžité velikosti populace  $n$ : čím větší populace, tím rychlejší růst:

$$dn/dt = rn$$

kde  $r$  je rychlostní konstanta (rychlost růstu populace vztahovaná na jednoho člena populace).

Vzhledem k tomu se tedy se zvětšující populací rychlost růstu znásobuje, u populací, jejichž dynamika je řízena pozitivní zpětnou vazbou platí: čím větší populace, tím větší je i nárůst populace.

Výsledkem tohoto procesu je exponenciální křivka nárůstu populace, křivka příznačná pro přítomnost pozitivních zpětných vazeb.

Takovou principiálně obdobnou křivku mohou v kratších časových obdobích sledovat nejrůznější procesy: růst HDP, štěpné reakce v jaderné fyzice, katalytické reakce v chemii, vzrůst ceny akcií, vzrůst nadšení fanoušků, závody ve zbrojení, inflace.

Pozitivní zpětná vazba tedy může stát za dynamickým růstem systému, ten však časem naráží na jisté hranice související zpravidla s omezeným přísunem zdrojů, čili s jistými limitami růstu.

V tomto bodě, čili v bodě, kdy je další růst znemožněn nedostatkem vnějších zdrojů (růst populace, ekonomický růst, závody ve zbrojení) nebo zdrojů vnitřních (vzrůst nadšení fanoušků, ekonomický růst, katalytická chemická reakce...) nastává kritický zlom.

To jestli limitující zdroj považujeme pro daný systém za vnitřní nebo vnější mnohdy závisí na vymezení systému, popř. jeho rozdělení na subsystémy.

Při dosažení kritického bodu, ve kterém systém naráží na vnější nebo vnitřní limity existují v zásadě dva možné scénáře jeho dalšího vývoje:

Dosavadní pozitivní zpětné vazby se promění v negativní a exponenciální úsek růstové křivky se pak zploští a přejde ve stav dynamické rovnováhy se svým prostředím s náhodným kolísáním hodnot kolem jisté střední hodnoty.

Například při obsazování volné ekologické niky jistou populací, může nejprve populace růst exponenciálně, pak ovšem začne být limitována zdroji na daném stanovišti a kompetičními vztahy s jinými živočichy: hustota populace se ustálí na určité hodnotě a na této může setrvat s náhodnými výchylkami okolo této hodnoty. Pokud může vývoj probíhat cestou přirozené sukcese, pak tato hodnota odpovídá nosné kapacitě ekosystému pro danou populaci při daných podmínkách.

Pokud zůstávají pozitivní zpětné vazby, způsobující růst veličin zachovány i po překročení limitů růstu, což je důsledkem selhání či neexistence regulačního mechanismu či opožděným nástupem zpětných vazeb, dospěje systém ke kolapsu: velikost populace prudce klesá, což někdy vede až k zániku příslušného ekosystému, populace či jeho transformaci na ekosystém s jiným uspořádáním.

Positivní vazba tedy mnohdy stojí na počátku strukturní (kvalitativní) změny systému.

Na druhou stranu nápadné změny početnosti populací, charakteristické střídáním fázemi exponenciálního růstu i poklesu nejsou u některých druhů ničím neobvyklým. Gradace následovaná silným přemnožením (kulminace), se pak střídá s útlumem (retrogradací) populace až na nízký stav (latenci). Takové dlouhodobé řízení populace pozitivními zpětnými vazbami se u některých druhů stalo jejich evoluční strategií a jako celek se dá nazvat rovněž dynamickou rovnováhou: struktura oscilací v čase zůstává zachována.

Příkladem může být vývoj populací arktických lumíků nebo hrabošů. Jedná se vesměs o systémy, kde převládající složku tvoří r-stratégové.

Negativní zpětné vazby v živých systémech odpovídají za udržování jistých veličin na setrvalých hodnotách, pouze s menšími odchylkami (fluktuacemi).

Zodpovídají tedy za udržování jistých veličin v živých systémech na optimálních hodnotách (na úrovni organismů například tělesné teploty, obsahu kyslíku nebo hormonů v krvi, na úrovni ekosystémů např. množství oxidu uhličitého v atmosféře, hustoty populací volně žijících druhů atd.)

Zpětné vazby tedy účinkují proti každé odchylce vnitřního prostředí způsobené vnějšími vlivy tak, že regulují odpovídajícím způsobem reakce systému.

Proto můžeme negativní zpětnou vazbu právem označit za hlavní princip stabilizace i v živých systémech.

Klasickým příkladem regulace zpětnou vazbou v populaci je populační dynamika dravec kořist citovaná v mnoha základních učebnicích ekologie a popsaná matematickým modelem Lotky-Voltery z 30. let 20. století.

Tento model lze tradičně demonstrovat například na vývoji početností populací zajíce a jeho predátora: lišky

Velikost populace lišky označíme  $m$ .

V první fázi populace zajíce roste, s tím, jak se zvyšuje populační hustota zajíce, stoupá i pravděpodobnost úspěšného lovu ze strany jeho predátora, lišky

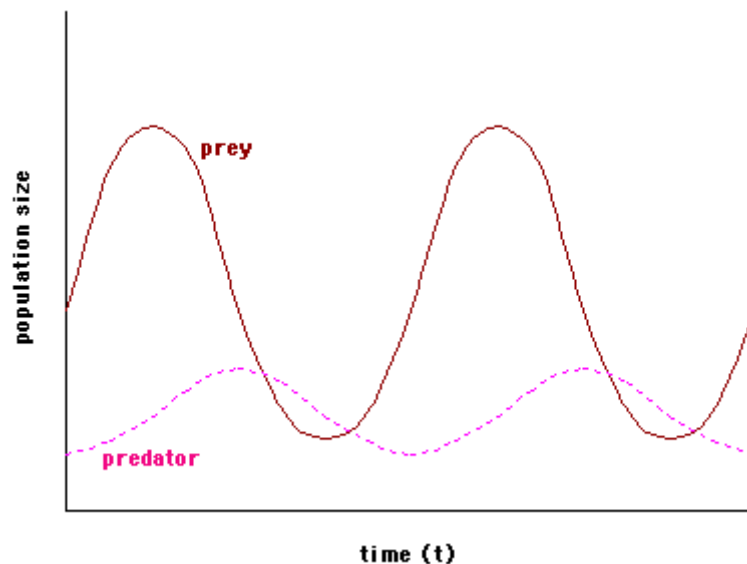


Více kořisti s jistým zpožděním zapříčiní tedy i nárůst populace lišky.

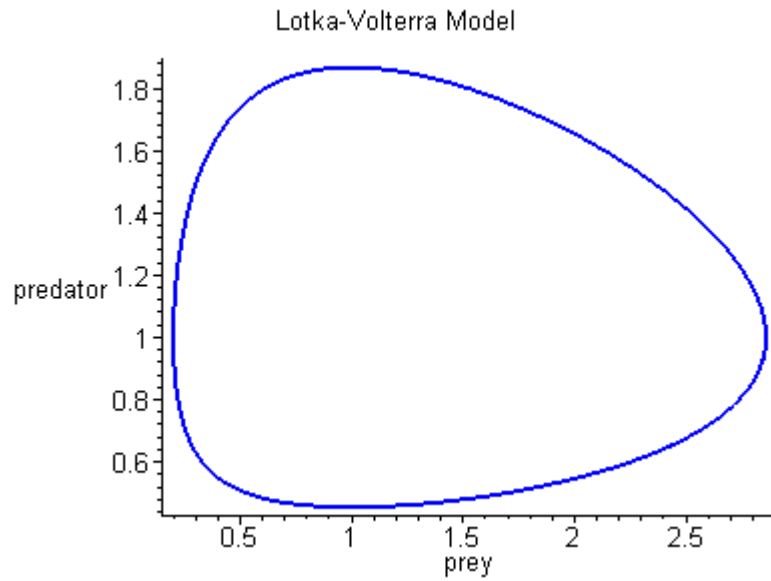
Ovšem nárůst populace lišky  $m$  jako predátora vede k postupnému poklesu populace zajíce a zabrání tedy exponenciálnímu růstu populace zajíce, který by dříve nebo později narazil na limity prostředí (viz předešle).

Liška tedy působí jako regulátor populace zajíce.

Snížení početnosti populace zajíce vede s určitým zpožděním i ke snížení populace populace lišky a celý oscilační cyklus se v ideálním případě opakuje.





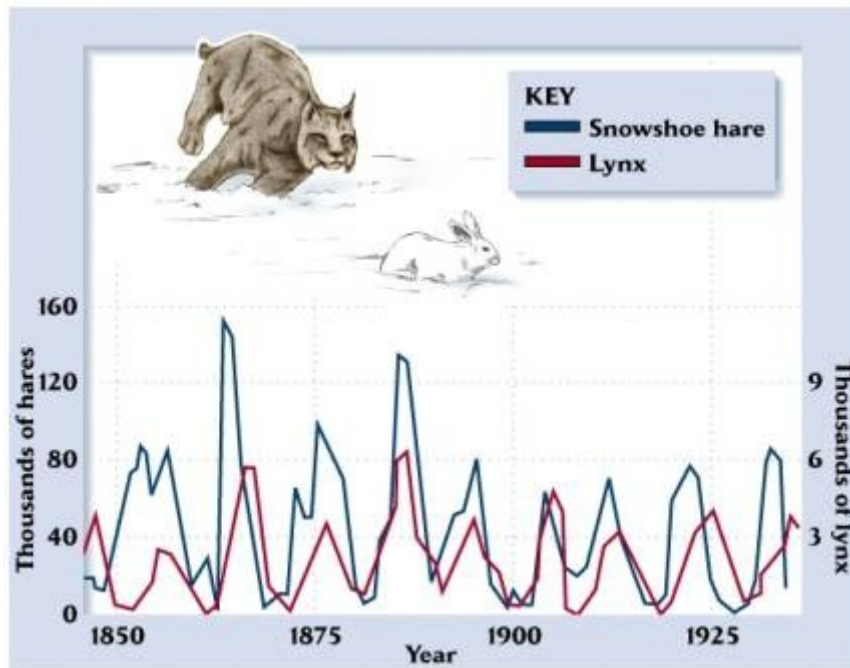


Je třeba mít na paměti, že předešlý model představuje velmi zjednodušenou situaci, která predikuje populační dynamiku dvou vzájemně provázaných druhů pouze na základě uvážení jejich vzájemné interakce, ovšem je nutné podotknout, že například populační hustota zajíce může být ovlivněna i dalšími faktory.

Příkladem může být cyklické kolísání populací zajíce měnivého a jeho predátora, rysa kanadského na obrovských územích od Aljašky po Newfoundland.



Délka jednoho cyklu je 9-11 let. Zajíc měnivý je v této oblasti dominantním býložravcem a jeho početnost se mění synchronizovaně.



Na základě předchozího obrázku, bychom soudili, že kolísání populace zajíce je provázáno s kolísáním populace rysa, který zde působí jako regulátor, že se tedy jedná o zpětnou vazbu, obdobně jako v předchozím případě.

Obdobné cykly početnosti severoamerických zajíců měnivých se však objevují i v oblastech, kde již byli rysově vyhubeni.

Jedná se tedy o náhodný jev?

Ukázalo se, že spouštěcí mechanismus kolísání obou populací pramení v interakci „zajíc-pastevní zdroje“

Kolísání počtu zajíců je tedy na počtu rysů nezávislé, ovšem vývoj početnosti populace rysa sleduje početnost kořisti.

Do předešle uvedeného schématu jednoduché interakce dvou druhů (liška-zajíc) tedy mohou vstupovat i další faktory.

V tomto případě byl tedy model uvažující pouze interakci mezi zajícem měnivým a rysem kanadským nepostačující pro vysvětlení populační dynamiky zajíce.

Pro vysvětlení cyklických oscilací této populace bylo nutné sledovat další proměnné:

Těmito faktory jsou množství podzimní biomasy rostlin a početnost populace tetřívka, dalšího významného konzumenta rostlinné biomasy lesů na sledovaném území a početnost populací celého souboru predátorů (mezi nimi i rysa kanadského).

V síti těchto vztahů je pouze vývoj populace rysa kanadského závislý na vývoji populace zajíce měnivého ve smyslu výše uvedené, jednoduché interakce, což platí i pro vývoj populace tetřívka, jehož populace je kontrolována rysem, rovněž ve smyslu jednoduché zpětné vazby.

K vysvětlení vývoje populací ostatních živočichů zahrnutých do této sítě je nutno uvážit další faktory.

Další důležitou informaci o populační dynamice poskytl výzkum prováděný v národním parku Isle Royal na 336 km<sup>2</sup> velkém prakticky neosídleném ostrově situovaném v Hořejším Jezeře.

Zde žije populace losa a od roku 1948 i populace vlka. Ostatní velcí býložravci nejsou přítomni a jedná se tedy o „modelově“ čistou situaci.

Zevrubný monitoring obou populací ukázal, že:

Jejich vývoj je komplikovanější a nevykazuje matematicky pravidelné cykly vyplývající z výše uvedeného modelu.

Zároveň však, platí, že početnost obou populací klesla jen velmi zřídka pod stav „normálu“ předpokládané dynamické rovnováhy

A navíc, již nikdy nedošlo k drastickému nárůstu populace sobů, jaký byl zaznamenán před příchodem vlka na ostrov, a který vedl k rozsáhlým škodám na ekosystému s dlouhodobějšími důsledky.

Zpětné vazby v populacích tedy prokazatelně fungují, jen do příslušných závislostí vstupují i další faktory, například v severských oblastech vliv chladnějších let atd. a tedy jen zřídka pozorujeme příslušné oscilace v matematicky čisté formě.

Ovšem důsledky přítomnosti zpětných vazeb v populacích pozorujeme: vyhubení predátora bez náhradní regulace početnosti kořisti vede k rychlému zvýšení populace kořisti, po němž následuje vlna zvýšené úmrtnosti v důsledku podvýživy, chorob a parazitů a negativní důsledky nepřírozně vysokých stavů kořisti lze potom pozorovat v rámci celého ekosystému.

Naopak v přírodních podmínkách je obvyklé, že dlouho před tím, než se projeví katastrofální důsledky extrémních populačních hustot, stoupne i početnost predátorů, kteří zbrání dané populaci (v tomto případě králíci) překročit kritické množství podmiňující vznik stresu.

V souvislosti s touto problematikou nelze nezmínit problém přemnožené spárkaté zvěře v rozsáhlých oblastech ČR, přičemž tento neutěšený stav a nezvládnutí regulace zvěře ze strany mysliveckých sdružení brání na mnoha místech přirozené obnově lesa a je jedním z hlavních faktorů spolupůsobící při degradaci lesů na území ČR.

Přítomnost zpětných vazeb v jistém systému tedy vytváří možnost jeho autoregulace.

Autoregulace je pojem klíčový pro všechny živé systémy, jelikož bez existence autoregulace by daný živý systém zcela jistě nebyl schopen při interakcích se svým prostředím zachovat svou strukturu.