

**TERMODYNAMIKA EKOSYSTÉMOV A HODNOTENIE
EKOLOGICKEJ INTEGRITY KRAJINY****Thermodynamics of ecosystems and evaluation
of ecological integrity of landscape****Peter Sabo****Abstrakt**

Príspevok približuje vybrané krajinnoekologicky relevantné pojmy z teórie komplexity a rozvíja teóriu využitia koncepcie nerovnovážnej termodynamiky biologických resp. ekologických systémov pre hodnotenie ekologickej kvality krajiny. Stručne hodnotí niektoré doteraz používané prístupy stanovenia ekologickej stability krajiny a upozorňuje na problémy s tým spojené. Následne navrhuje nové spôsoby určenia koeficientov ekologickej významnosti ekosystémov, tentoraz na báze ich usporiadania a ekologickej integrity – ako miery efektívnosti disipácie exergie, čo umožní aj precíznejšie hodnotenie stavu krajiny ako celku. Súčasťou diskusie je porovnanie podobnosti resp. rozdielnosti očakávaných výsledkov, ktoré môžu byť získané rôznymi spôsobmi hodnotenia krajiny a návrhu pre aplikáciu novej teórie.

Kľúčové slová: krajina, integrita krajiny, ekologická kvalita krajiny

Abstract

The contribution presents notions from the complexity theory, which are relevant to landscape ecology, and enhances concept of the non-equilibrium thermodynamics of biological and ecological systems, important for landscape quality evaluation. It briefly evaluates several methods used for evaluation of landscape ecological stability and points to some of their problems. Consequently, the paper presented outlines new ways how to determine coefficients of the ecological importance of the ecosystems and ecological importance of the landscape on the basis of their ecological integrity – as a measure of exergy dissipation. This leads to more precise evaluation of the landscape as a whole. Discussion includes short comparison of the results expected, which may be obtained by means of various methods of landscape diagnosis and also proposes application of a new theory.

Key words: landscape ecology, ecological integrity, evaluation

Úvod

Rozvoj kvantovej fyziky a kybernetiky a prenikanie ich poznatkov do biológie viedli k lepšiemu pochopeniu princípov spätnej väzby, autoregulácie a autoorganizácie, na báze ktorých sa od polovice 20. storočia rozvíja teória zložitosti (Decker 1996, Lucas 2002). Veda o zložitosti skúma ako vznikajú a organizujú sa zložité hierarchické systémy, vrátane biologických, ekologických aj sociálnych systémov. Sústreďuje sa na otázky časopriestorového usporiadania týchto systémov, ktoré zabezpečuje takú súhrnu celku a prvkov, že prvky a komponenty systému plnia funkcie vyžadované celkom (Goldsmith 1996). Celok obmedzuje autonómnosť svojich komponent, bráni aktivitám, ktoré sú nekonzistentné s udrжанím integrity systému. Nový celostný prístup sa preto sústreďuje nielen na merateľné vlastnosti komponent systému, ale snaží sa zmapovať aj ich interakcie, vplyvy medzi komponentami. Práve konfigurácia interakcií vytvára nové, tzv. emergentné vlastnosti systému – vynárajúce sa na príslušnej úrovni organizácie systému a určuje obraz stavového priestoru jeho správania sa. Kľúčové pojmy teórie zložitosti ako sú autoregulácia, autoorganizácia, autopoieza, homeodynamika, atď. približujú napr. Capra (1997), Rose (1997). Vo vzťahu k ekosystémom ich aplikujú napr. Green (1998), Kay (2000), vo vzťahu ku krajine ich približuje napr. Sabo (2002). V tomto príspevku chceme načrtnúť jednu z významných implikácií teórie komplexity pre hodnotenie krajiny.

1. Základné východiská – termodynamika, disipatívne štruktúry, atraktory

Autoorganizáciu (samoorganizáciu) charakterizuje rast zložitosti prírodných aj sociálnych systémov, vytváranie mnohoúrovňovej hierarchickej organizácie, usporiadania komponent, procesov a funkcií v priestore a čase. Predpokladom autoorganizácie prírodných systémov je prítomnosť mnohých interagujúcich prvkov a komponent, ktoré sú čiastočne autonómne, súčasne sú „koordinované“ autoorganizačnými mechanizmami vyššieho celku (Lucas 2002). Výsledkom synergického efektu mnohonásobných interakcií je zabezpečenie podmienok života systému (napr. interakcie druhov v ekosystéme, ekosystémov v krajine), ktorý dokáže vytvoriť súčasne podmienky pre život celku aj komponent systému (napr. organizmov, druhov, spoločenstiev).

Holarchia prírodných systémov

Autoorganizujúce sa systémy vytvárajú hierarchiu prostredníctvom vnárania sa jednoduchších systémov do hierarchicky vyšších systémov, ktoré sú organizovanejšie (Folke et Folke 1993). Kay (2000) rozvíja

konceptiu otvorených autoorganizujúcich sa holarchických systémov (tzv. SOHO systémy), kde holarchia vyjadruje recipročné pôsobenie rôznych hierarchických úrovní systému. SOHO systémom je aj každá krajina – zreteľná časopriestorová hierarchia biologických a ekologických systémov rámcuje cestu od organel a buniek, cez pletivá resp. tkanivá, orgány a ich systémy, organizmy, populácie, spoločenstvá a ekosystémy až po krajiny rôznych rádov a biosféru. Každú úroveň charakterizuje osobitná štruktúra, ekologické procesy a nové systémové vlastnosti. Ide o systémy z termodynamického hľadiska otvorené, avšak organizačne relatívne uzavreté, fungujúce na báze neustáleho prísunu vysokokvalitnej energie – exergie. Podľa 2. termodynamického zákona pri zmene energie z jednej formy na druhú vždy dochádza k degradácii – disipácii časti energie na menej kvalitnú, rozptýlenú a menej užitočnú. To znamená, že v uzavretých systémoch sa znižuje ich usporiadanie, rastie entropia.

Nerovnovážna termodynamika živých systémov a disipatívne štruktúry

Keďže biologické a ekologické systémy sú termodynamicky otvorené, nesmerujú k neusporiadanosti, ale naopak, za neustáleho importu vysoko kvalitnej energie (s vysokou schopnosťou konať prácu, tj. s vysokou exergiou), budujú vysoko usporiadané štruktúry, ktoré Ilya Prigogin (in Capra 1997) nazval disipatívnymi. V termodynamicky nerovnovážnom stave sú udržiavané neustálym prísunom energie, ktorú využívajú a degradujú (disipujú), čím naplňajú 2. termodynamický zákon. (podľa tohto zákona entrópia vesmíru stále narastá). Organizmy, ekosystémy a krajina predstavujú zložité, autoorganizujúce sa, vysoko usporiadané štruktúry, ktorých organizovanosť sa zvyšuje najmä v obdobiach rastu, vývoja a rozmnožovania, pričom usporiadanie si tvoria z „chaosu“ stavebných prvkov dostupných v pôde, vode, ovzduší.

Svoju usporiadanosť živé systémy zvyšujú na úkor exportu entrópie do okolia (vo forme tepla a exkrementov). Prigoginovu teóriu disipatívnych štruktúr rozvíjajú Schneider a Kay (1992): Termodynamická otvorenosť znamená, že všetky živé a ekologické systémy existujú v nerovnovážnom stave ďaleko od bodu termodynamickej rovnováhy, do ktorého ich v dobe rastu, vývoja a evolúcie vychýlil prísun vysokokvalitnej energie – exergie. Pojem exergia tu vyjadruje termodynamický gradient, mieru vychýlenia systému z termodynamicky rovnovážneho stavu. Autoregulačné mechanizmy sa najpr snažia tomuto vychýleniu zabrániť alebo ho zvrátiť za účelom udržania pôvodnej štruktúry a charakteristických vlastností systému. (Tomuto princípu zodpovedá pojem ekologickej stability.) Avšak po prekročení kritickej vzdialenosti od bodu rovnováhy (bifurkačný bod) sa v otvorenom systéme spontánne vynárajú nové ekologické procesy, ktoré

dokážu využiť vyšší prísun energie na budovanie a organizáciu novej, zložitejšej štruktúry a jej udržiavanie (Prigogine in Capra 1997, Kay 2000).

Nová štruktúra efektívnejšie využíva energiu, hmotu a informáciu, znižuje pôvodný energetický gradient a nastoľuje novú vnútornú ekologickú rovnováhu systému. Táto ekologická rovnováha nie je rovnováhou termodynamickou, čo je paradoxne podmienkou života. V prípade organizmov, ekosystémov a krajín zvýšený prísun exergie vedie k tvorbe nových zložitých disipatívnych štruktúr, ktoré zmenšujú vertikálne aj horizontálne gradienty tokov energie a lepšie využívajú prírodné zdroje, čo zvyšuje vnútornú rovnováhu ekosystémov a tým aj ich schopnosť prežitia – obr. 1. V tomto rámci možno vysvetliť aj evolúciu vyšších foriem života, aj postupnosť sukcesných štádií ekosystémov – každé vyššie sukcesné štádium má vyššiu organizovanosť, vyššiu rozmanitosť trofických vzťahov a níc, vyššiu špecializáciu druhov, čo všetko spolu prispieva k efektívnejšiemu využívaniu zdrojov.

Atraktory

Disipatívne štruktúry umožňujú nastoliť vnútornú ekologickú rovnováhu ekosystémov a krajín, kde úroveň využitia exergie do veľkej miery zodpovedá jej prísunu do systému. Výsledkom sú kvázi stabilné postupnosti stavov, ktorými prechádza krajina a jej ekosystémy. Tieto postupnosti stavov vytvárajú trajektórie podobných až opakovaných tvarov nazývané atraktory. Domnievame sa, že zotrvávanie ekosystémov krajiny v oblastiach daných atraktorov vyjadruje jej vnútornú aj vonkajšiu ekologickú stabilitu ako schopnosť dlhodobo udržiavať a obnovovať podmienky svojej existencie autoregulačnými mechanizmami (Izakovičová et al. 1997). Schopnosť ekosystému udržiavať túto stabilitu, zachovávať, obnovovať a reprodukovať relatívne konštantné podmienky vnútorného prostredia systému pri zmene vonkajších podmienok je homeostáza (Smith 1996). Homeostáza krajiny vyrovnáva oscilácie spôsobené disturbanciami.

Zotrvávanie v oblasti atraktora charakterizujú menšie fluktuácie premenných, čo umožňuje reprodukovať podstatné vlastnosti systému aj pri dynamických zmenách jeho stavov. Existencia atraktora súvisí nielen s homeostázou, ale aj s homeodynamikou systému (Rose 1998), ktorá spočíva v prestavovaní vnútorných autoregulačných mechanizmov počas vývojovej trajektórie resp. životného cyklu za účelom zachovania podstatných vlastností a integrity systému. Bežná dynamika ekosystémov a krajín vedie k existencii viacerých atraktorov, medzi ktorými sa ekosystém pohybuje v závislosti od zmien gradientov energie alebo zmien iných ekologických faktorov. Zmenou prísunu exergie alebo vplyvom iných činiteľov formovania krajiny (napr. hnojenie rybníka, zmena intenzity

využívania lúky) môžu ekosystémy a krajina prejsť do iných kvázi stabilných postupností stavov, ktoré sú vyjadrené inými atraktormi.

2. Ekologická stabilita krajiny

Ekologická stabilita ekosystémov

Myslíme, že k pojmu atraktoru má pri ekologických systémoch blízko termín ekologická stabilita, pojem odvodený predovšetkým v rámci teórie manažmentu lesných ekosystémov (Míchal 1992). **Ekologická stabilita lesa je tu definovaná ako „schopnosť lesných ekosystémov v podmienkach pôsobenia vonkajších faktorov udržiavať vlastnú dynamickú homeostázu vnútornými autoregulačnými mechanizmami (odolnosť – rezistencia) alebo sa po odznení narušenia navrátiť do pôvodného dynamického stavu (pružnosť – resiliencia) alebo ku svojmu normálnemu vývojovému smerovaniu. Čím rýchlejšie je ekosystém schopný vrátiť sa a čím menšie odchýlky od dynamického stavu vykazuje, tým je stabilnejší“** (Vološčuk 2000). V rámci teórie komplexity je zrejme, že pojem „dynamický stav“ presnejšie vyjadríme pojmom kvázi-stabilná postupnosť stavov, to znamená zotrvávanie systému v oblasti určitého atraktora.

Odolnosť (rezistencia) tu vyjadruje schopnosť ekosystému zabrániť zmenám svojej vnútornej štruktúry a tým aj podstatných vlastností systému počas pôsobenia rušivého faktora. **Pružnosť (resiliencia)** je schopnosť ekosystému navrátiť sa do pôvodných funkčných vzťahov po skončení pôsobenia rušivého faktora (Čaboun 1997). Les predstavuje typ klimaxového ekosystému, jeho ekologická stabilita súvisí s vysokou diverzitou vertikálnych väzieb v trofických reťazcoch (a tým aj ciest disipácie exergie), s vysoko efektívnym obehom biogénnych prvkov, čo je výrazom relatívne vysokej usporiadanosti prirodzených lesných ekosystémov. Tá umožňuje efektívnu disipáciu exergie a tým vysokú odolnosť klimaxu voči narušeniu. Skutočná situácia je zložitejšia, aj v prirodzených klimaxových ekosystémoch pôsobí **dynamika disturbancií a sukcesie**, ktorá tu vytvára posúvajúcu sa mozaiku rôznych sukcesných štádií vývoja lesa. Pojem ekologickej stability má už v strednej Európe určitú tradíciu pri hodnotení lesných ekosystémov.

Niektoré problémy spojené s používaním termínu ekologická stabilita.

Otázky pojmu ekologická stabilita sa týkajú dynamiky ekologických systémov, kde sú často v rozpore snahy o zachovanie dynamickej funkčnosti systému a snahy o udržanie „stálosti“, napr. za účelom trvalého odobrania produkcie biomasy. Stabilita je pojem pomerne ťažko aplikovateľný pre opis prírodných systémov, ktoré sú v neustálom pohybe, vývoji a premene.

Problém je zreteľný najmä v prípade ekosystémov nižších sukcesných štádií: napr. druhovo pestrá lúka pod hornou hranicou lesa sa považuje za ekosystém relatívne ekologicky stabilný. Táto stabilita je však podmienená pravidelným odoberaním biomasy (v biomase akumulovanej exergii) kosením alebo pastvou, inak nastupujú sukcesné procesy. Vývojový potenciál lúky pri ukončení obhospodarovania smeruje ku klimaxu, **atraktor lúky vystrieda atraktor lesa.** Systém v tomto smere nie je ekologicky stabilný, avšak vývoj smerom ku klimaxu je z pohľadu disipácie exergie a budúcej ekologickej rovnováhy nového ekosystému pozitívny. To už nemusí platiť z pohľadu diverzity flóry druhovo pestrých lúk, ktorá sa zarastaním drevinami znižuje. Na druhej strane, po skosení lúky sa výrazne zmenia termodynamické pomery, čo vedie k nástupu autoorganizačných procesov a k relatívne rýchlej obnove disipatívnych štruktúr lúky. Schopnosť obnovy vyjadruje vysokú resilienciu lúky, neklimaxového ekosystému s vysokou horizontálnou biodiverzitou. Z pohľadu resiliencie je teda lúka ekologicky stabilným ekosystémom, túto stabilitu však paradoxne podmieňuje vysoká dynamika prírodných procesov tohto ekosystému. Naviac, je tiež evidentné, že *„ekologická stabilita nie je univerzálna, ale vždy ide o schopnosť ekosystému (odolnosť a pružnosť) vzhľadom ku konkrétnemu vplyvu“* (Čaboun 1997).

Druhovo pestrá lúka je cenným ekosystémom a v krajine má aj svoj ekostabilizačný význam. **Vhodnejším termínom pre charakteristiku jej funkčnosti sa nám javí ekologická integrita**, (pojem definujeme v časti 4). Táto na rozdiel od pojmu stabilita reflektuje dynamiku vývojových aj disturbančných zmien v ekosystémoch a krajine. **Ekologická integrita ako miera funkčnosti lúky resp. optimálneho usporiadania jej disipatívnej štruktúry vyjadruje jej životaschopnosť (vitalitu), biodiverzitu, schopnosť udržiavania ekologickej rovnováhy, spektrum funkcií poskytovaných človeku, ale tiež jej evolučný potenciál.** (Príklad prechodov lúčneho ekosystému medzi niektorými jej atraktormi sme priblížili v práci o komplexite v agroenvironmentálnych programoch (Sabo 2003)). **Funkčnosť, usporiadanosť a integritu považujeme za univerzálne termíny**, ktoré zahŕňajú aj ekologickú stabilitu ako dynamickú schopnosť ekosystémov trvale udržiavať a obnovovať podmienky svojej existencie autoregulačnými mechanizmami (Miklós, Drdoš in Izakovičová et al. 1997). Podrobnejšie sa im budeme venovať v ďalších kapitolách.

Priestorová ekologická stabilita

Významnú aplikáciu v koncepcii územných systémov ekologickej stability (ÚSES – Miklós 1982, Ružičková, Šibl 2000) našla **koncepcia priestorovej ekologickej stability krajiny**. Drdoš a Miklós (in Izakovičová et al. 1997) ju definujú ako *„dynamickú schopnosť krajinnnej štruktúry zachovať priestorové ekologické vzťahy medzi individuálnymi ekosystémami (na zabezpečenie výmeny hmoty, energie a informácií) pre dynamickú*

variabilitu podmienok aj foriem života, a to aj za predpokladu, že krajina je tvorená lokálne ekosystémami s rôznym – aj nízkym stupňom vnútornej ekologickej stability“. Pôsobenie ekologicky labilných ekosystémov tu je vyrovňované pôsobením ekologicky stabilnejších ekosystémov. Z pohľadu komplexity je dôležité, že definícia zdôrazňuje priestorové vzťahy, t.j. vhodné usporiadanie a prepojenie ekosystémov v krajine. Určitou analógiou ÚSES je aj koncepcia ekologických sietí (Jongman 1996), ktorá sa však viac sústreďuje na otázky ochrany biologickej diverzity, má teda užší kontext ako teória i prax ÚSES.

3. Súčasné prístupy k hodnoteniu krajiny na báze ekologickej stability

Koeficienty ekologickej stability

Viaceré metódy kvantitatívneho hodnotenia priestorovej ekologickej stability krajiny používajú číselné koeficienty ekologickej stability alebo ekologickej významnosti pre rôzne typy ekosystémov a následne počítajú príspevky jednotlivých prvkov využitia zeme (Miklós 1986, Supuka et al. 2003). Napríklad $K_{ES} = (\sum p_i \cdot k_{esi}) / P$, kde p_i je výmera krajinných prvkov typu „i“, k_{esi} je koeficient ekologickej významnosti pre prvky typu „i“ a P je celková výmera územia (Supuka et al 2003). Pridelenie koeficientov ekologickej významnosti ilustruje tabuľka 2.

Zložitejší postup stanovuje koeficient ekologickej významnosti prvku podľa stupňa kvality plôch $k_{esi} = (1,5 \cdot A + 1,0 \cdot B + 0,5 \cdot C) / (0,2 \cdot D + 0,8 \cdot E)$, kde A až E označujú podiel plochy od najvyššieho stupňa po najnižší stupeň kvality. Podľa vypočítaných hodnôt sa konkrétna krajina hodnotí ako devastovaná, ak výsledný spriemerovaný koeficient ekologickej stability krajiny

$K_{ES} < 0,1$, ako narušená, avšak schopná autoregulácie, ak $0,1 < K_{ES} < 1,0$, ekologicky vyvážená, ak $K_{ES} = 1,0$, s prevažujúcou prírodnou zložkou, ak $1,0 < K < 10$ a prírode blízka ak $K_{ES} = 10$ (Supuka 2003). Stanovené koeficienty ekologickej významnosti reflektujú význam sukcesnej vyspelosti a prirodzenosti jednotlivých ekosystémov krajiny (napr. vysoký koeficient ekologickej významnosti lužného lesa oproti smrekovým monokultúram, ale aj oproti lúkam).

Otázky koeficientov ekologickej stability v kontexte komplexity

Problémy s používaním uvedených koeficientov (okrem pomerne hrubého členenia) spočívajú najmä v tom, že nereflektujú rozdiely medzi ekosystémami z pohľadu ich schopnosti disipácie exergie. Napríklad kosodrevina aj lužný les majú priradený rovnaký koeficient $K_{ES} = 1$, čo reflektuje vysoký stupeň pôvodnosti týchto typov ekosystémov. Avšak z pohľadu termodynamiky disipácia exergie lužným lesom bude výrazne vyššia ako disipácia exergie kosodrevinou - v lužnom lese možno

predpokladať podstatne vyššiu evapotranspiráciu, vyššiu tvorbu biomasy, vyššiu biodiverzitu, vyššiu rozmanitosť vertikálnych väzieb v trofických reťazcoch. To znamená, že porasty kosodreviny v subalpínskom pásme majú nižšiu usporiadanosť - sú oveľa menej ekologicky integrované) a tým citlivejšie voči prirodzeným environmentálnym aj antropogénnym impaktom.

Iné kritériá hodnotenia ekologickej stability

Zaujímavý prístup k hodnoteniu ekologickej stability prezentovali Ružička a Hrnčiarová (1995), ktorí definovali tri skupiny kritérií: vlastnosti podporujúce ekologickú stabilitu krajiny – prvky súčasnej krajinej štruktúry s ekostabilizačnou účinnosťou, ďalej faktory ochraňujúce a rozvíjajúce ekologickú stabilitu, vyplývajúce napr. z právne zabezpečených záujmov ochrany prírody a faktory znižujúce ekologickú stabilitu krajiny, ktoré vyplývajú z antropickej záťaže prostredia. Ale reflexia socioekonomických záujmov nedáva obraz aktuálnej ES územia. Ďalšie prístupy k hodnoteniu ES územia reflektujú stupeň hemeróbie rôznych plôch v krajine (t.j. miery ich ovplyvnenia antropogénnym impaktom), avšak v praxi sa používa hrubé rozlíšenie (napr. silne, stredne a slabo zmenené plochy), čo vedie k hrubému členeniu plôch na najmenej, stredne a najviac ekologicky stabilné (Tremboš a kol., 1999) a to nedáva reálny obraz krajiny. Komparáciu metodických prístupov k ekologickej stabilite prezentujú Durilová a Saksa (2003).

Hodnotenie ekologickej stability krajiny má iste praktický význam. Pomerne hrubé rozlíšenie rôznych stupňov ekologickej stability v kombinácii s prirodzenou nelinearitou ekologických procesov však sťažuje predikcie budúceho vývoja ekologickej rovnováhy krajiny. Zdá sa nám, že teória komplexity a termodynamiky ekosystémov dnes otvárajú nové možnosti hodnotenia práve na báze miery vyššie spomínanej ekologickej usporiadanosti a ekologickej integrity.

4. Krajina ako ekologicky integrovaná entita

Krajina ako disipatívna štruktúra, evolúcia ako rast zložitosti

Tradične sa medzi hlavné činitele formovania štruktúry krajiny zaraďujú abiotické podmienky, biotické interakcie, disturbancie a využitie zeme (Turner et al 20001). Z pohľadu termodynamiky sú dôležitým faktorom formovania tejto štruktúry toky exergie, hlavný generátor usporiadanosti, zložitosti a rozmanitosti krajiny (za podmienky dostupnosti ďalších prírodných zdrojov). Krajina predstavuje termodynamicky otvorenú vysoko organizovanú a súčasne dynamickú disipatívnu štruktúru, ktorá na svoju tvorbu a udržiavanie efektívne využíva exergiu. Disipácia exergie vysvetľuje aj zvyšovanie zložitosti organizmov, ekosystémov a krajín počas ich vývoja, ako aj otvorenú architektúru

biologických a ekologických systémov (tab. 1). Krajina ako disipatívna štruktúra má osobitné postavenie v hierarchii organela - bunka - pletivo / tkanivo - orgán - organizmus - populácia - spoločenstvo - ekosystém - krajina (obr. 2).

Uvedený kontext mení aj pohľad na evolúciu, prírodný výber už nie je len otázkou prežitia druhov, ale najmä otázkou vzniku nových vhodných, optimálnych spôsobov usporiadania - vývoj zložitých disipatívnych štruktúr charakterizuje vyššie formy života aj klimaxové ekosystémy. Kvalita disipácie slnečnej energie sa prirodzene zvyšuje so sukcesnou vyspelosťou ekosystémov, s rastom biodiverzity a rozmanitosti ekologických procesov, vrátane ciest transformácie energie v trofických reťazcoch. Evolučný proces buduje stále usporiadanejšie disipatívne štruktúry, rastie rozmanitosť trofických sietí, štrukturálnych vzťahov a ekologických funkcií krajiny. Do určitej miery to platilo aj pre tradične maloplošne obhospodarovanú krajinu s mozaikou ekosystémov a ich rozmanitých sukcesných štádií. Evolúciu sprevádza zvyšovanie objemu informácií v DNA druhov, ktoré krajinu obývajú, ako aj v ľudských artefaktoch - časť slnečnej exergie sa popri jej degradácii o.i. akumuluje aj v exergii biomasy a v organizačnej exergii biologických systémov (Folke et Folke 1993).

Definovanie ekologickej integrity krajiny

Domnievame sa, že k významným nástrojom pre hodnotenie krajiny patrí určenie ekologickej integrity krajiny a v nej vnorených ekosystémov (ako miery ich funkčnosti). Leo a Levin (1997) považujú ekologickú integritu za komplexný fenomén, ktorého zhodnotenie si vyžaduje sadu indikátorov. V kontexte termodynamiky však funkčnosť otvoreného systému možno minimálne indikovať cez jeho schopnosť disipovať exergiu a vytvárať stále zložitejšie štruktúry. Ekologickú integritu krajiny a jej ekosystémov definujeme ako mieru funkčnosti, efektívnosti a neporušenosti ich vnútorného usporiadania a ich holarchickej organizácie. Túto integritu môžeme vyjadriť prostredníctvom schopnosti systému efektívne disipovať exergiu. Efektívnosť disipácie exergie vyjadruje kvalitu odpovede krajiny a jej ekosystémov na energetický gradient, ktorý udržiava ich existenciu v oblasti termodynamickej nerovnováhy. (V kultúrnej krajine k tokom exergie pristupuje aj ľudská práca a energia fosílnych palív.)

Ekologickú integritu krajiny a jej ekosystémov charakterizujeme ako absolútnu aj ako relatívnu. Z termodynamického hľadiska definujeme absolútnu ekologickú integritu krajiny ako mieru funkčnosti a optimálnosti usporiadania krajiny a jej ekosystémov, vzhľadom ku tokom exergie, bez ohľadu na konkrétne podmienky jednotlivých fyziotopov. To znamená, že púšť bude mať v našom hodnotení minimálnu absolútnu ekologickú integritu, tropický prales maximálnu, hoci oba

ekosystémy zaznamenávajú vysoké toky slnečnej energie. Ak sa vrátíme k nášmu príkladu, tak lužný les aj kosodrevina budú mať rôznu absolútnu ekologickú integritu, ktorá bude v prípade porastu kosodreviny nižšia, pretože oveľa menej efektívne disipuje exergiu, ktorej tok je v Tatrách výrazne väčší ako v prípade Podunajska. Absolútna ekologická integrita ako miera funkčnosti a usporiadanosti súčasne ponúka vysvetlenie, prečo sa oba ekosystémy výrazne líšia aj svojou biodiverzitou a dynamickou ekologickou stabilitou. Lepšie spracovanie exergie znamená súčasne vyššiu usporiadanosť a tým aj odolnosť voči zmenám podmienok prostredia. Lužný les je teda ekologicky usporiadanejším a stabilnejším ekosystémom.

Z termodynamického hľadiska definovaná relatívna ekologická integrita systému je miera funkčnosti a optimálnosti usporiadania ekologického systému viazaná tak vo vzťahu k tokom exergie ako aj k špecifickým podmienkam fyziotopu a spôsobom využitia zeme, ktoré rôznym spôsobom podporujú, obmedzujú alebo až znemožňujú tvorbu disipatívnych štruktúr (môžeme porovnať bohaté štruktúry mokradí a chudobné púšte). Relatívnu ekologickú integritu môžeme určiť ako mieru optimálnosti usporiadania konkrétneho (geo) ekosystému vo vzťahu k príslušnému referenčnému nenarušenému ekosystému prvej krajinej štruktúry, ktorý charakterizujú veľmi podobné podmienky abiotického komplexu, vrátane rovnakého termodynamického gradientu. Z pohľadu disipácie exergie sa zložitost' relatívne ekologicky integrovanej krajiny nachádza v intervale najväčšej vitality, t.j. krajina je pre dané podmienky optimálne usporiadaná. To znamená, že rôzne nenarušené ekosystémy budú mať podobne vysokú relatívnu integritu. V prípade narušených ekosystémov sa ich integrita bude znižovať v priamej závislosti so stupňom hemeróbie. Z tohto pohľadu porasty kosodreviny spolu so špecifickými podmienkami ich fyziotopu predstavujú vysoko optimálne usporiadaný ekosystém, môžeme povedať, že relatívne vysoko ekologicky integrovaný. Relatívna ekologická integrita je teda nepriamo úmerná stupňu hemeróbie krajinného prvku. Rozdiel oproti koncepcii hemeróbie je v tom, že ekologickú integritu krajiny neodvodzujeme na základe analýzy antropogénnych impaktov, ale podľa relatívnej miery disipácie exergie v krajine.

Ekologická integrita krajiny v procese života

Ekologická integrita krajiny znamená kontinuálne zabezpečenie usporiadania krajinného systému, organizácie jeho ekologických procesov a funkcií, a súčasne udržiavania, obnovy a tvorby disipatívnych štruktúr krajiny. S určitým zjednodušením môžeme hovoriť o živote krajiny ako o rekurzívnom procese, ktorý spája organizáciu funkcií a procesov v krajine s jej konkrétnou fyzickou štruktúrou a s konkrétnou fyzickou štruktúrou jej ekosystémov. Na obr. 3 ilustrujeme aplikáciu kľúčových kritérií života navrhnutých Caprom (1997) -

usporiadanie vzťahov v systéme, fyzickú štruktúru a životný proces, ktorý ich prepája, práve na krajinu.

Vychádzame z princípu vnárania ekosystémov a krajín do hierarchicky vyšších systémov - koncepciu krajín ako otvorených autoorganizujúcich sa SOHO systémov ilustruje aj vnáranie sa povodí do väčších povodí. EIK označuje mieru optimálneho usporiadania štruktúry a procesov krajiny - vo vertikálnej a horizontálnej rovine a v časovom rade genézy krajiny.

Niektoré základné vlastnosti ekologickejšie vysoko integrovanej krajiny

- **Zdravie, vitalita, diverzita** – kontinuum a rozmanitosť ekologických procesov, ktoré efektívne disipujú exergiu a efektívne využívajú dostupné zdroje v intervale najväčšej vitality (Shelfordov zákon tolerancie má analógiu v optimálnej zložitosti krajiny a jej ekosystémov.) Môže sa merať aj nepriamo prostredníctvom biodiverzity, heterogenity a konektivity. Krajinná diverzita je spravidla negatívne korelovaná s intenzitou využitia zeme (Olah 2003).
- **Ekologická rovnováha** – vyjadruje schopnosť krajiny odolávať stresu (rezistencia), zotaviť sa po narušení (resiliencia), dlhodobo udržiavať, obnovovať a zlepšovať podmienky svojej existencie autoregulačnými a autoorganizačnými mechanizmami. Ilustruje ju sledovanie dráh určitých atraktorov (ekologická stabilita), ale tiež prechody medzi atraktormi, ak sa realizujú bez zhoršenia ekologickej kvality. K tejto koncepcii má najbližšie priestorová ekologická stabilita Miklósa a Drdoša (Izakovičová et al. 1997). Ekologická rovnováha je pozitívne korelovaná so zastúpením sukcesne vyšších ekosystémov a tiež s ich ekvitabilitou v krajine.
- **Funkčnosť krajiny** – vyjadruje bohatstvo, variabilitu a kapacitu prírodných funkcií (de Groot 1992) resp. ekosystémových služieb (Constanza et al 1997, Bastian 1998). Ide o spektrum úžitkových vlastností krajiny, kľúčové sú život udržiavajúce, regulačné funkcie (napr. regulácia klímy, obehu biogénnych prvkov, absorpcia odpadov). Priestorové funkcie poskytujú priestor pre ľudské aktivity, napr. osídlenie, energetiku, poľnohospodárstvo, lesné hospodárstvo, turizmus, ale aj ochranu prírody, atď. Sociálne funkcie upevňujú väzby medzi členmi spoločnosti, informačné a estetické funkcie prispievajú k psychickému zdraviu, vnútornému obohateniu a poznaniu. Patrí k nim aj kvalita krajinného obrazu.
- **Evolučnosť, vývojový potenciál autoorganizácie** - schopnosť krajiny reorganizovať disipatívne štruktúry v závislosti od zmien vyššieho systému (napr. v dôsledku globálneho otepľovania). Keďže primárnu

evolučnou tendenciou je komplexita krajiny, základom evolučného potenciálu krajiny je dostatočný počet a rozmanitosť ekosystémov, druhov a tiež vertikálnych horizontálnych a časových väzieb, vrátane diverzity kultúrnych systémov.

Nižšie navrhujeme postup indikácie ekologickej usporiadanosti a ekologickej integrity krajiny.

Návrh hodnotenia absolútnej ekologickej integrity krajiny

Predpokladom absolútnej ekologickej integrity krajiny je vysoká funkčnosť a usporiadanosť, ktorá je vyjadrená vysokou diverzitou a bohatstvom väzieb vo vzťahu k prísunu vysokokvalitnej energie a dostupnosti prírodných zdrojov (najmä vody a živín). Nižšie priblížime nový prístup k hodnoteniu krajiny na báze jednej holistickej premennej – teploty povrchu krajiny resp. energie infračerveného žiarenia povrchu krajinných prvkov.

Vzťah medzi teplotou povrchu a vyžarovaním dlhovlnného žiarenia

Absolútna teplota povrchu krajinného prvku určuje tok žiarenia emitovaného povrchom. Podľa Stefan-Boltzmanovho zákona $M_e = \epsilon \sigma T^4$, kde M_e je tok energie emitovaného infračerveného (dlhovlnného) žiarenia z jednotky plochy (intenzita vyžarovania v $W \cdot m^{-2}$), ϵ je emisivita, vyžarovacia schopnosť povrchu príslušného krajinného prvku (jej hodnota je vždy menšia ako 1) a σ je Stefan-Boltzmanova konštanta $5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$, T je absolútna teplota povrchu (vyjadrená v Kelvinoch, $K = C + 273$, C je teplota nameraná na Celsiovej stupnici). Wienov zákon definuje vlnovú dĺžku povrchom emitovaného žiarenia, pri ktorej bude radiácia energie najväčšia $\lambda_m = b/T$, kde b je Wienova konštanta rovná $2,897798 \cdot 10^{-3} \mu m \cdot K$ a T je teplota povrchu v Kelvinoch. Maximálna spektrálna intenzita vyžarovania na vlnovej dĺžke λ_m je priamo úmerná piatej mocnine teploty povrchu $M_{e\lambda m} = \epsilon k' T^5$, kde k' je konštanta $k' = 1,3 \cdot 10^{-11} W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot K^{-5}$ (Hrvoľ, Tomlain 1997). To znamená, že absolútna teplota povrchu ekosystému alebo vlnová dĺžka maxima emitovaného žiarenia môžu byť za určitých podmienok využité na precíznejšie hodnotenie zdravotného stavu krajiny resp. indikáciu jej ekologickej integrity - než ako to umožňujú dnes používané koeficienty ekologickej stability.

Zjednodušená radiačná bilancia ekosystému

Využitie vysoko kvalitnej energie ekosystémom spočíva v akumulovaní časti exergie v biomase a v genetickej informácii, najmä však v degradácii na teplo (evapotranspiráciou, metabolizmom). S určitým zjednodušením a pri zanedbaní horizontálnych tokov energie môžeme radiačnú bilanciu ekosystému (čistý tok energie Q_n absorbovaný plošnou jednotkou

povrchu krajinného prvku - napr. lesa, lúky, mokrade, rybníka, poľa) určiť nasledovne:

$Q_n = Q_e * (1 - \alpha) - L_{e\uparrow} + L_{a\downarrow} * (1 - \alpha_a)$, kde Q_e je tok krátkovlnného slnečného žiarenia na povrch ekosystému, α je albedo povrchu, určuje percento odrazeného krátkovlnného žiarenia voči celkovému toku žiarenia, $L_{e\uparrow}$ je dlhovlnné žiarenie emitované povrchom ($L_{e\uparrow} = \varepsilon \sigma T^4$), $L_{a\downarrow}$ je dlhovlnné žiarenie vyžiarené späť k zemskému povrchu skleníkovými plynmi atmosféry, α_a je albedo dlhovlnného žiarenia. (Upravené podľa Hrvol, Tomlain 1997, Quattrochi a Luvall, 1999).

Radiačná bilancia ekosystému je v skutočnosti zložitým fenoménom, v rovnici sme zanedbali napr. príjem rozptýlenej časti krátkovlnného žiarenia, ďalej žiarenia, odrazeného na sklonené plochy od iných plôch, vegetácie, oblakov aj zoslabenie žiarenia atmosférou. V praxi tiež treba uvažovať s korekciami toku žiarenia podľa sklonu a expozície plôch krajinných prvkov, na čo však existujú vhodné matematické postupy, ktoré tu kvôli prehľadnosti príspevku nerozoberáme.

Naším cieľom je komparatívna analýza využitia exergie, preto obídeme podrobnú analýzu energetickej bilancie krajinného prvku: $Q_n = Q_v + Q_H + Q_G$, kde Q_v je tok energie využitý na evapotranspiráciu, Q_H je kondukčný prenos energie do vzduchu a Q_G je tok energie do pôdy (Smith 1996). Z pohľadu vzťahov v krajine sú dôležité aj horizontálne vstupy a výstupy energie.

Koeficienty absolútnej ekologickej integrity krajinného prvku

Cieľom je komparácia radiačnej bilancie rôznych typov ekosystémov, napríklad radiačnú bilanciu dvoch typov ekosystémov, A a B v zjednodušenom tvare vyjadrujú rovnice:

$$Q_{n,A} = Q_{eA} * (1 - \alpha_A) - L_{eA\uparrow} + L_{a\downarrow} * (1 - \alpha_{aA}), \quad Q_{n,B} = Q_{eB} * (1 - \alpha_B) - L_{eB\uparrow} + L_{a\downarrow} * (1 - \alpha_{aB})$$

Keďže spätné vyžarovanie dlhovlnného žiarenia atmosférou $L_{a\downarrow}$ je v priebehu dňa nad krajinou relatívne stále, aj jeho príspevok k výslednej energetickej bilancii ekosystémov bude podobný a výsledky komparácie ekosystémov výrazne neovplyvní. V tejto etape vývoja novej metódy hodnotenia krajiny sa preto stačí obmedziť na porovnávanie zjednodušenej energetickej bilancie:

$$Q_{n,A} = Q_{eA} * (1 - \alpha_A) - L_{eA\uparrow} \quad ? < ? = ? > \quad Q_{n,B} = Q_{eB} * (1 - \alpha_B) - L_{eB\uparrow}$$

Je zrejmé, že čím bude Q_n (za podmienky porovnateľnosti iných ekologických faktorov) väčšie, tým účinnejšie dokáže daný ekosystém dissipovať exergiu, tým je ekologicky integrovanejší, čo z pohľadu krajiny ako celku znamená aj vyššiu ekostabilizačnú účinnosť krajinného prvku. Veľkosť tokov exergie sa však plynulo znižuje od rovníku k pólom. Preto je

vhodná určitá standardizácia, vzťahnutie využitej exergie k reálnemu toku exergie na krajinný prvok. Účinnosť disipácie exergie ekosystémom vyjadrím pomerom využitej, t.j. disipovanej pôvodnej exergie, k skutočnému toku exergie, čím získame mieru organizovanosti stavu ekosystému (Kay 2000) vo vzťahu k jeho optimálnemu usporiadaniu, mieru ekologickej integrity. **Koeficient absolútnej ekologickej integrity krajinného prvku preto stanovíme nasledovne:**

$$K_{EIA} = Q_n / Q_e * (1 - \alpha), \text{ t.j. } K_{EIA} = (Q_n = Q_e * (1 - \alpha) - L_{e\uparrow}) / Q_e * (1 - \alpha) = 1 - \varepsilon \sigma T^4 / Q_e * (1 - \alpha)$$

Absolútna ekologická integrita krajiny

Koeficient absolútnej ekologickej integrity krajiny vypočítame podobne ako pri klasickom hodnotení ekologickej stability $K_{EIKa} = (\sum p_i * k_{Ei}) / P$, kde p_i je podiel i-tej plochy, k_{Ei} je koeficient ekologickej integrity i-tej plochy, P je celková plocha územia. Tento výpočet zatiaľ neberie do úvahy horizontálne toky exergie, heterogenitu, kontrast a konektivitu krajiny, ich zapracovanie ostáva výzvou pre budúcnosť – niektoré námety prezentuje napr. Sabo (2002).

Hodnotu Q_e získame buď priamym meraním alebo z dostupných databáz priemerných mesačných, denných, hodinových súm priameho slnečného žiarenia. Infračervené žiarenie emitované povrchom krajinného prvku možno merať prostredníctvom satelitných snímkov diaľkového prieskumu zeme (Quattrochi, Luvall 1997) alebo je možné merať teplotu povrchu krajinného prvku snímaním emitovaného žiarenia infračervenou kamerou, najlepšie z nízko letiaceho lietadla, prípadne merať priamo na mieste (povrch zastavanej plochy, ornej pôdy, lúky, mokrade, atď.), čo však je problém v prípade lesného ekosystému, pretože vnútri lesa zistíme vplyv zmenených mikroklimatických podmienok, nie však disipáciu exergie ekosystémom.

Nakoľko tok žiarenia sa v priebehu dňa aj ročného obdobia mení, je potrebné, aby porovnávacie merania teplôt povrchu ekosystémov alebo emitovaného infračerveného žiarenia boli realizované v rovnakých periódach a za kvázi-rovnakých poveternostných podmienok, v letných mesiacoch, najlepšie za jasných dní. Krajinu totiž treba hodnotiť pri vysokom prísune exergie a pri jej vyššej disipácii, kedy sa rozdiely integrity ekosystémov zvýraznia. Keďže pozemné meranie teploty naraz na mnohých miestach krajiny je organizačne aj technicky náročné, osobitne v prípade lesných ekosystémov, treba ho chápať ako korekciu údajov získaných z diaľkového prieskumu zeme. Tok slnečného žiarenia treba tiež vždy prepočítat podľa jeho zoslabenia v atmosfére, ďalej podľa sklonu a expozície svahov a výšky slnka nad horizontom. **Topografické aspekty hrajú významnú rolu práve v prípade sukcesne mladších ekosystémov**

(Quattrochi, Luvall 1999) výrazne ovplyvňujú termodynamickú bilanciu krajiny a je ich nutné brať do úvahy.

Diskusia a záver

Príspevok prezentuje ekologickú integritu, mieru funkčnosti a usporiadanosti krajiny a do nej vnorených ekosystémov ako univerzálny nástroj indikatívneho hodnotenia zdravia krajiny. Vyššie sme navrhli stanoviť jej absolútnu ekologickú integritu (analogicky ako ekologickú stabilitu) prostredníctvom výpočtu koeficientov absolútnej ekologickej integrity, vnútornej usporiadanosti jednotlivých ekosystémov krajiny alebo aspoň ich rôznych typov. Napriek niektorým zjednodušeniam aj počiatočným nedostatkom (napr. otázka dostupnosti údajov diaľkového prieskumu zeme s dostatočne jemným rozlíšením, otázka prostriedkov na zalietanie územia a snímanie infračerveného vyžarovania povrchu krajinných prvkov vhodnou kamerou) sa domnievame, že nový prístup má vysoký potenciál pre budúce hodnotenie krajiny. Prezentujeme ho ako syntézu vybraných postupov hodnotenia ekologickej stability krajiny (Duriľová, Saksá 2003) a možností teórie zložitosti, osobitne termodynamiky biologických a ekologických systémov, ktorú rozvíjajú napr. Folke et Folke (1993), Capra (1997), Kay (2000). Praktické aplikácie si vyžadujú ďalšie teoretické a metodické rozpracovanie. Výzvou pre budúcnosť, najmä v súvislosti s globálnym otepľovaním ostáva napr. hodnotenie vplyvu spätne emitovaného dlhovoľného žiarenia, klasifikácia exergie rôznych úrovní a typov (vrátane reflexie exergie ľudskej práce a exergie fosílnych palív), práca s horizontálnymi tokmi exergie a možnosťami ich disipácie v poľnohospodárskej krajine, napr. pomocou drevinovej vegetácie, mokradí, druhovo pestrých lúk, ktoré oživujú krajinu Slovenska.

Príležitosťou a výzvou do budúcnosti je aj výpočet koeficientov relatívnej ekologickej integrity pre referenčné typy prírodných ekosystémov prvej krajinej štruktúry (potenciálna vegetácia) a následne precíznejšie kvantitatívne hodnotenie úbytku usporiadanosti, ktorý sa premieta do úbytku biodiverzity a znižujúcej sa schopnosti krajín zabezpečovať podmienky ľudskej existencie.

Niektoré podobnosti a rozdiely očakávaných výsledkov podľa metód uvedených v 2 a v 4

- Absolútna ekologická stabilita krajiny sa zvyšuje so zastúpením sukcesne vyspelých ekosystémov, sú považované za ekostabilizačné prvky. Sukcesne vyspelé ekosystémy sú prirodzene usporiadanejšie, lepšie disipujú exergiu a ich povrch bude mať relatívne nižšiu a priestorovo menej variabilnú priemernú teplotu T , následne koeficient

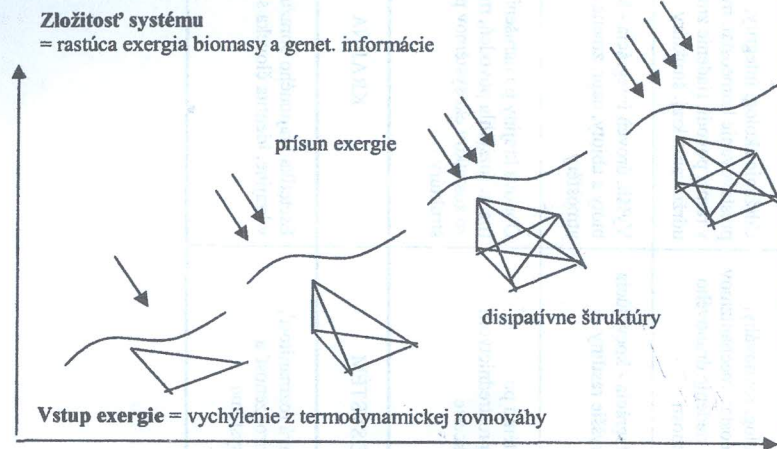
ekologickej integrity $K_{EIA} = 1 - \varepsilon \sigma T^4 / Q_e \cdot (1 - \alpha)$ bude pre ekosystém relatívne vysoký. Dá sa očakávať postupné zvyšovanie koeficientov K_{EIA} od sukcesne mladých ekosystémov smerom ku klimaxovým.

- V prípade hodnotenia pôvodných ekosystémov je im priradený vysoký stupeň ekologickej stability. Tak napr. kosodrevina a lužný les majú $k_{es} = 1$. Ako sme však už uviedli v časti 3, takéto hodnotenie nezodpovedá skutočnosti. Je síce pravda, že kosodrevina je klimaxovým ekosystémom pre subalpínske pásmo, avšak jej disipácia exergie je tu oveľa nižšia ako v lužnom lese, o čom svedčí aj výrazný rozdiel v biodiverzite a produkcii biomasy. Koeficient absolútnej ekologickej integrity K_{EIA} bude výrazne nižší ako v prípade lužného lesa. V praxi sa tento rozdiel nazýva aj citlivosťou resp. zraniteľnosťou ekosystému alebo krajiny. Koncepcia absolútnej ekologickej integrity umožňuje zahrnúť do hodnotenia krajiny aj prirodzené rozdiely medzi pôvodnými ekosystémami, rozlíšiť aj prírodné krajiny s rôznou vnútornou ekologickou stabilitou, krajiny prirodzene citlivejšie a krajiny odolnejšie.
- Absolútna aj relatívna ekologická stabilita krajiny sa znižuje so zastúpením narušených ekosystémov a tým so zjednodušenými trofickými väzbami (napr. orná pôda má priradený koeficient $k_{es} = 0,14$ a smrekové monokultúry $k_{es} = 0,38$). Analogicky platí, že s narušením ekosystémov klesá ich usporiadanosť a tým absolútna aj relatívna ekologická integrita.

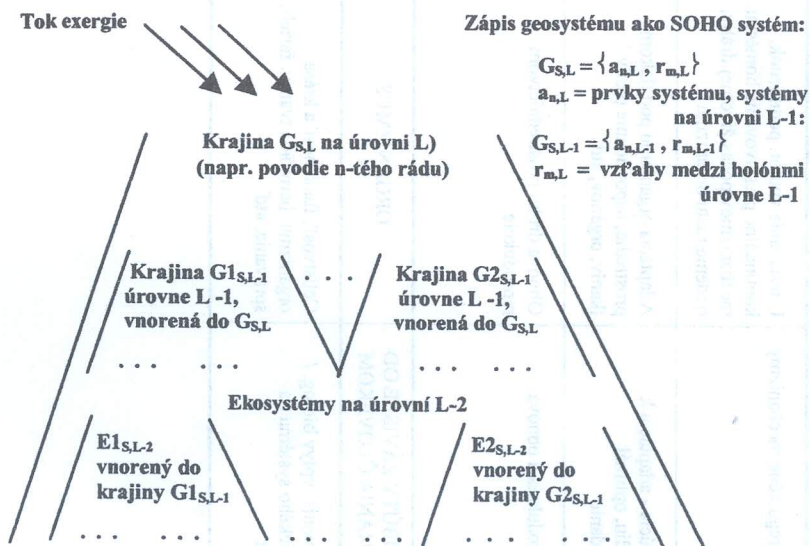
Môžeme zhrnúť, že nový navrhnutý prístup hodnotenia krajiny na báze ekologickej integrity umožňuje rozlišovať nielen medzi sukcesnou vyspelosťou ekosystémom, ale reflektuje aj stupeň ich narušenia, ako aj prirodzené rozdiely integrity ekosystémov prvej krajinej štruktúry. Relevantnosť predloženej teórie s riešeným projektom na Poľane vidíme v tom, že práve historické krajinné štruktúry Južného Podpoľania, s vysokou krajinnou aj biologickou diverzitou, s mozaikovou krajinou tvorenou ekosystémami s rôzne vysokou usporiadanosťou môžu byť vhodným modelovým územím na ilustráciu aj overenie možností novej metódy.

Prílohy:

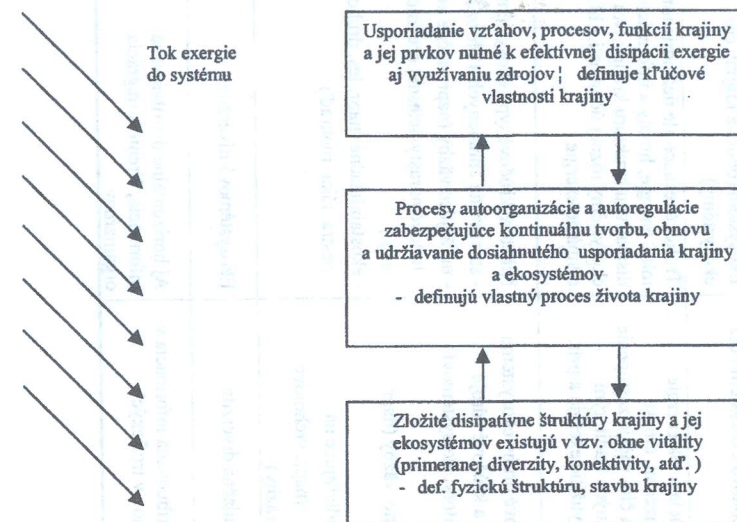
Obr. 1 Vývoj disipatívnych štruktúr smerom k rastúcej zložitosti



Obr. 2 Architektúra vnorených SOHO systémov



Obr. 3 Kritériá života podľa Capru aplikované na krajinu



Tab. 1 Krajina ako „živý“ ekologický systém, príklad analógie vybraných atribútov troch rôznych úrovni holarchického systému

ATRIBÚTY NEZÁVISLÉ OD VNÍMANIA ČLOVEKOM	ORGANIZMUS	EKOSYSTÉM	KRAJINA
1) Základná jednotka štruktúry	Bunka (obnova organizmu na úrovni buniek)	Organizmus (obnova ekosystému cez organ.)	Ekosystém (obnova krajiny cez ekosystémy)
2) Disipácia exergie a využitie prír. zdrojov, najmä živín a vody	Fotosyntéza, transpirácia, celkový metabolizmus organizmu	Evapotranspirácia a tok energie trofickými reťazcami, čím sú rozmanitejšie a čím väčšie zastúpenie vyšších sukcesných štádií, tým efektívnejšie využitie exergie a prír. zdrojov	Trofické reťazce ale tiež horizontálne toky, energie, hmoty a informácie, disipatívnu štruktúru krajiny tvoria ekosystémy rôznej účinnosti z hľadiska disipácie exergie
3) Významné stavebné kamene fyzickej štruktúry systému	Niektoré kľúčové podsystémy organizmu - oporné (napr. stonky rastlín, kostra živ.) - udržiavajúce väzby (napr. cievy systému) - autoregulačné systémy (napr. nervový, endokrínologický, hormonálny)	Niektoré kľúčové druhy ekosystému - tvoriace niky a kľúčové zdroje (napr. edifikátory, ekosystémoví inžinieri) - udržiavajúce kritické väzby (napr. opel'ovače) - výrazne sa podieľajúce na autoregulácii (napr. vrcholové predátory, parazity)	Niektoré kľúčové typy ekosystémov - stanovištia chránených a ohrozených druhov - udržiavajúce väzby (napr. riečne koridory, líniové porasty nelesnej drevinovej veg.) - ekostabilizačné (napr. les, druhovo pestrá lúka, mokrad')
4) Biologická rozmanitosť	Diverzita buniek, pletív, tkanív a orgánov	Druhovú a populačnú diverzitu	Ekosystémová diverzita
5) Genetická informácia	Uložená v DNA v jadre každej bunky	Vertikálne distribuovaná informácia v DNA organizmov v trofických reťazcoch	Aj horizontálne distribuovaná informácia, šírenie a migrácia organizmov

pokračovanie tab. 1

6) Autoregulačné mechanizmy	Udržiavanie vnútor. podmienok, kontinuálne prestavovanie homeostat. mechanizmov počas životnej dráhy, riadenie rastu organizmu	Udržiavanie ekolog. rovnováhy, prestavov. homeostat. mechanizmov počas sukcesie, riadenie druhového zloženia a početnosti	Udržiavanie ekolog. integrity, prestavovanie homeostat. mechanizmov v rámci povodí, riadenie zmeny aj udržiavania kraj. štruktúry
7) Evolúcia - adaptácia k prostrediu, optimál. usporiadanie	Adaptácia organizmu pod tlakom prostredia, usporiadanie pletív / tkanív, orgánov, atď.	Adaptácia aj integrácia - koevolúcia druhov, napr. vyššie rastliny a opel'ovače	Vyššia úroveň integrácia - koevolúcia bioty a abioty, napr. zmena zloženia atmosféry
8) Reprodukcia a obnova	Obnova druhu prostredníctvom reprodukcie	Obnova ekosystému po disturbanciách prostredníctvom sekundárnej sukcesie	Obnova krajiny po narušení jej štruktúry (napr. rozsiahla povodeň, monokultúry) zo zostatkov ekosystémov pôvodnej štruktúry
ATRIBÚTY ZÁVISLÉ OD VNÍMANIA ČLOVEKOM	ORGANIZMUS	EKOSYSTÉM	KRAJINA
9) Harmoniz. vplyv biolog. / ekologického systému na človeka	Celistvosť, funkčnosť a krása organizmu, harmónia tvarov, farieb, správania, atď.	Integrita, druhová rozmanitosť, unikátnosť, prirodzenosť a funkčnosť ekosystému	Esetetika krajinného obrazu, artefakty v krajine, identita človeka s krajinou

Tab. 2 Ilustrácia Koeficientov ekologickej významnosti rôznych prvkov krajiny (zdroj: Supuka et al. 2003)

Prvok využitia zeme – typy skupín ekosystémov	Koeficient ekol. významnosti
Zastavané a dopravné plochy	0,00
Orná pôda, chmeľnice	0,14
Vinice	0,29
Smrekové monokultúry	0,38
Ovocné sady, agátové lesy	0,43
Záhrady	0,50
Lúky	0,62
Pasienky	0,68
Rybníky a vodné plochy	0,79
Lužné lesy	1,00
Kosodrevina	1,00
Ostatné plochy	0,14

Príspevok vznikol s finančnou podporou VEGA v rámci projektu: Trvalo udržateľné využívanie lesa vo vzťahu k ekologickej stabilite krajiny Biosférickej rezervácie - chránenej krajinej oblasti Poľana č. 1 / 1328 / 04

Literatúra

- Bastian, D., 1998:** The assessment of landscape functions one precondition to define management goals, In: Ecology, Vol. 17, Supplement 1/98, Bratislava, s. 19-33.
- Capra, F., 1997:** The Web of Life: A new synthesis of Mind and Matter, 77-85 Fulham Palace Road, Hammersmith, London, ISBN 0-00-654751-6, s. 320.
- Čaboun, V., 1997:** Ekologická stabilita lesných ekosystémov vzhľadom na ich vývojové štádium, Zborník referátov z odborného seminára Racionálne využívanie a obhospodarovanie CHKO-BR Poľana, konaného 5. júla 1997, Zvolen, s. 169-172.

- Folke, G., Folke, C., 1993:** Characteristics of Nested Living Systems, Journal of biological Systems, vol. 1, (3), s. 257 – 274.
- Constanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., van de Belt, M., 1997:** The value of the world's ecosystem services and natural capital, Nature, 387, s. 253-260.
- Decker, E.H., 1996:** Self-Organizing Systems: A Tutorial in Complexity, [online] URL: <http://www.ncst.emet.in/kbcs/ivek/issues/13.1/sos/sos.html>.
- De Groote, 1992:** The Functions of Nature, Marion Boyars Publishers, Ltd., London, UK, ISBN 90-01-35594-3, s. 315.
- Goldsmith, E., 1996:** The Way: An Ecological World - View, Themis Books, Dartington, Devon, ISBN 0-9527302-3-5, s. 553.
- Green, D. G., 1998:** Complexity in ecological systems, The Johnstone Centre, Charles Stuart University, Australia, <http://www.csu.edu.au/esa/esa97/papers/green/green.html>.
- Hrvoľ, J., Tomlain, J., 1997:** Žiarenie v atmosfére, Matematicko-fyzikálna fakulta, Univerzita Komenského v Bratislave, ISBN 80-223-1088-3, s. 134.
- Izakovičová, Z., Miklós, L., Drdoš, J., 1997:** Krajinnokoekologické podmienky trvalo udržateľného rozvoja, Veda, Bratislava, ISBN 80-224-0485-3, s. 183.
- Jongman R.H.G., 1996:** Research priorities: scientific concepts and criteria, in Nowicki, Bennett, Middleton, Perspectives on ecological networks, Man and Nature, vol.I., ECNC, Arnhem, s.151-160.
- Kay, 2000:** Ecosystems A Self-Organizing Holarchic Open Systems: Narratives and the Second Law of Thermodynamics, In: Jorgenses, S.E., Müller, F. (eds): Handbook of Ecosystem Theories and Management, CRC Press –Lewis Publishers, s. 135-160.
- Leo, D.G., Levin, S., 1997:** The Multifaceted Aspects of Ecosystem Integrity, In: Conservation Ecology 1/97, Ecological Society of America, [online] URL: <http://www.consecol.org/Journal/vol1,iss1/art3>, 23 pp.
- Lucas, Ch., 2002:** Self-Organizing Systems (SOS) Frequently Asked Questions, [online] URL: <http://www.magna.com.au/r/orf.brown/news97-h.html>
- Miklós, L., 1986:** Stabilita krajiny v ekologickom genereli SSR, Životné prostredie, vol. 20., No 2/1986, s. 87-93.
- Miklós, L., Izakovičová, Z., 1997:** Krajina ako geosystém, Veda, Vydavateľstvo SAV Bratislava, ISBN 80-224-0519-1, s.152.
- Olah, B., 2003:** Vývoj využitia krajiny Podpoľania, Starostlivosť o kultúrnu krajinu prechodnej zóny Biosférickej rezervácie Poľana, Vedecké štúdie

1/2003/B, Fakulta ekológie a environmentalistiky, Technická Univerzita vo Zvolene, ISBN 80-228-1251-X, s. 110.

Quattrochi, D.A., Luvall, J.C., 1999: Thermal infrared remote sensing for analysis of landscape ecological processes: methods and applications, Landscape Ecology, 14, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, p. 577-598.

Rose, S., 1998: Lifelines - Biology, Freedom, Determinism, Penguin books, Middlesex, England, ISBN 0-14-023700-3, s. 333.

Ružička, M., Hrnčiarová, T., 1995: Metóda klasifikácie ekologickej stability územia, Životné prostredie, Bratislava, vol. 29, No. 5/1995, s. 249-254.

Ružičková, J., Šibl, J., 2000: Ekologické siete v krajine, Prírodovedecká fakulta UK Bratislava, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, ISBN 80-7137-761-9, s. 181.

Sabo, P., 2002: Zložitosť autoorganizujúcich sa systémov a ekologická integrita krajiny, In: Zborník z konferencie „Nové trendy v krajinej ekológii“, október 2002, Piešťany, UK Bratislava, ISBN 80-223-1878-0, s. 213 - 227.

Sabo, P., 2003: Komplexita krajiny, ekosystémové služby a ich reflexia v agroenvironmentálnych plánoch, In: Zborník prác z vedeckej konferencie s medzinárodnou účasťou: Udržateľné poľnohospodárstvo a rozvoj vidieka, 25-26.septembra 2003, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, ISBN 80-8069-246-7, s. 420-423.

Schneider, E.D., Kay, J.J., 1992: Life as Manifestation of the Second Law of Thermodynamics, Mathematical and Computer Modelling, Vol. 19, No.6-8, pp. 25-48.

Smith, R., L., 1996: Ecology and Field Biology, HarperCollins Publishers, New York, ISBN 0-06-500976-2, s. 740.

Supuka, J., Hreško, J., Končeková, L., 2003: Krajinná ekológia, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, ISBN 80-8069-223-8, pp. 194.

Tremboš, P., a kol., 1999: Miestny územný systém ekologickej stability sídelného útvaru Piešťany, Geoinfo, Piešťany.

Turner, M.G., Gardner, R.H., O'Neill, R.O., 2001: Landscape Ecology in Theory and Practice, Springer-Verlag, New York, ISBN 2-8317-0744-7, pp. 401.

Vološčuk, I., 2000: Environmentálne systémy, Lesný ekosystém, Technická univerzita vo Zvolene, Fakulta ekológie a environmentalistiky, Katedra aplikovanej ekológie, ISBN 80-228-0949-7, s. 117.

Adresa autora:

Ing. Peter Sabo, CSC.

Katedra ekológie a environmentálnej výchovy

Fakulta prírodných vied

Univerzita Mateja Bela

Tajovského 40, 974 00 Banská Bystrica

E-mail: sabo@fpv.umb.sk

0,10	0,10
0,20	0,20
0,30	0,30
0,40	0,40
0,50	0,50
0,60	0,60
0,70	0,70
0,80	0,80
0,90	0,90
1,00	1,00
1,00	1,00
0,10	0,10

als

Technická univerzita vo Zvolene
Lesnícka fakulta
Katedra ochrany lesa a poľovníctva



Trvalo udržateľné využívanie lesa v podmienkach prírodnej rezervácie

Zborník referátov z odborného seminára

Zvolen, 2004

Organizátor seminára: Katedra ochrany lesa a poľovníctva
Lesnícka fakulta TU vo Zvolene
Masaryka 20, 960 53 Zvolen

Zborník bol vydaný s finančnou podporou vedeckej grantovej agentúry VEGA v rámci riešenia projektu „Trvalo udržateľné využívanie lesa vo vzťahu k ekologickej stabilite krajiny Biosférickej rezervácie – chránenej krajinskej oblasti Poľana“
č. 1 / 1328 / 04

Editori: doc. RNDr. Dagmar Sláviková, CSc.
Ing. Martin Pavlík, PhD.

Recenzovali: doc. RNDr. Dagmar Sláviková, CSc.
Ing. Gita Jančová, CSc.
doc. Ing. Milan Kodrík, PhD.
Ing. Martin Pavlík, PhD.
Ing. Štefan Pavlík, PhD.

(Príspevky neprešli jazykovou úpravou)

© Technická univerzita vo Zvolene
Lesnícka fakulta
Katedra ochrany lesa a poľovníctva

ISBN 80-228-1401-6

Obsah

Úvod..... 5

Dagmar Sláviková

VEDECKO-VÝSKUMNÁ AKTIVITA EKOLOGOV A LESNÍKOV AKO ZÁKLAD STAROSTLIVOSTI
O CHRÁNENÉ ÚZEMIA – KONKRÉTNE CHKO – BR POĽANA
Scientific and research activities of ecologists and foresters as a basic tool
for protected area management – on the example of Polana Biosphere Reserve 7

Peter Sabo

TERMODYNAMIKA EKOSYSTÉMOV A HODNOTENIE EKOLOGICKEJ INTEGRITY KRAJINY
Thermodynamics of ecosystems and evaluation of ecological integrity
of landscape 18

Gita Jančová

OSOBITNE CHRÁNENÉ ČASTI PRÍRODY NA SLOVENSKU A NAVRHOVANÉ PREHODNOTENIE
NÁRODNEJ SÚSTAVY
Nature areas protected under specific conditions in Slovakia and proposed
reconsideration of national network 42

Jaroslav Škvarenina, Katarína Střelcová, Jozef Mindáš

BIOKLIMATOLOGICKÝ A EKOFYZIOLOGICKÝ VÝSKUM KULTÚRNYCH A KLIMAXOVÝCH
SMREČÍN BR POĽANA
Bioclimatological and ecophysiological research in Biosphere Reserve Poľana 49

Eva Uhliarová, Karol Ujházy, Monika Janišová

ZMENY A OHROZENIE TRÁVNÝCH PORASTOV V SEVEROZÁPADNEJ ČASTI CHKO-BR
POĽANA
Changes and threat of grasslands in the north-western part of Protected Landscape
Area-Biosphere Reserve Poľana 64

Vladimír Kunca

DEPOZIČNÉ VSTUPY Z ATMOSFÉRY A STANOVENIE KRITICKÝCH DEPOZIČNÝCH LIMITOV
NA PRÍKLADE CHKO POĽANA A ŠTIAVNICKÉ VRCHY
Atmospheric deposition inputs and determination of critical deposition limits on an
example of Protected landscape areas Poľana Mts. and Štiavnické vrchy Mts. 81

Martina Mihaliková

RÔZNE PRÍSTUPY K HODNOTENIU EKOLOGICKEJ STABILITY LESNÝCH EKOSYSTÉMOV
Des approches différentes de l'évaluation de la stabilité écologique des écosystèmes
forestiers..... 89

Martin Pavlík

DESAŤROČIE VÝSKUMU KATEDRY OCHRANY LESA A POĽOVNÍCTVA NA POĽANE.
The decade of research at the Department of forest protection and game
management in Polana Mts. 96

Milan Kodrík

CHARAKTERISTIKY PODZEMNEJ BIOMASY V OBLASTI POĽANY
Below-ground characteristics in the area of Poľana..... 107

Štefan Pavlík

PODMIENKY AKTIVIZÁCIE AGRESÍVNYCH DRUHOV PODKÔRNIKOVITÝCH V SMREKOVÝCH
LESOCH NPR ZADNÁ POĽANA (BIOSFÉRICKÁ REZERVÁCIA POĽANA)
Conditions for outbreaks of aggressive bark beetles in spruce forests
of the National Nature Reserve Zadáň Poľana (the Biosphere Reserve Poľana).... 114

Tibor Lukáč, Jozef Tajboš

ZHODNOTENIE DREVA NA PLOCHÁCH POSTIHNUÝCH VETROVOU KALAMITOU
V OCHRANNÝCH LESOCH
Timber valorization on planes attacked wind disaster in protection forest..... 120

Andrej Gubka

MOŽNOSTI VÝSKUMU LYKOŽRÚTA SMREKOVÉHO V BR POĽANA
Possibility of investigation of spruce bark beetle in BR Poľana 129

Úvod

Vedecko-výskumná práca je základom rozvoja poznania a jej výsledky slúžia ako podklad pre menežovanie aktivít a racionálne využívanie prírodných zdrojov v krajine, špeciálne ale v chránených územiach.

V súlade so zákonmi v oblasti životného prostredia a ochrany prírody sa riešia vedecké projekty v národných parkoch, chránených krajinných oblastiach, z ktorých Tatry, Slovenský kras, Východné Karpaty, Poľana, sú zároveň vyhlásené v rámci programu Človek a biosféra za biosférické rezervácie.

Dňa 29. apríla 2004 sa na Katedre ochrany lesa a poľovníctva Lesníckej fakulty TU vo Zvolene konal odborný seminár „Trvalo udržateľné využívanie lesa v podmienkach prírodnej rezervácie“. Organizovanie seminára vyplynulo zo začiatku riešenia grantového projektu „Trvalo udržateľné využívanie lesa vo vzťahu k ekologickej stabilite krajiny biosférickej rezervácie – Chránenej krajinskej oblasti Poľana“, ktorý sa bude riešiť v rokoch 2004–2006. Riešitelia projektu sú pracovníci Lesníckej fakulty TU vo Zvolene a Fakulty prírodných vied UMB v Banskej Bystrici.

Ciele projektu sú formulované v rámci problematiky ochrany lesa a ochrany prírody a krajiny. Projekt je zameraný na monitoring zdravotného stavu lesných drevín a porastov, výskum húb ako bioindikátorov s osobitným zreteľom na ektomykorízy, premnoženie podkôrneho hmyzu v prírodných rezerváciách horského typu. Aktuálne je hodnotenie významu a funkcií mŕtveho dreva v lesoch a ekologickej stability lesných porastov. Lesné porasty v horských a podhorských regiónoch nie sú len kompaktné. Z hľadiska foriem využitia pôdneho fondu sa v tomto type krajiny vyskytujú trvalé trávne porasty, čím sa vytvára mozaika lesných a lúčnych ekosystémov a zvyšuje ekologická stabilita krajiny.

Predmetom výskumu na území CHKO-BR Poľana je trvalo udržateľné využívanie lesa a trvalých trávnych porastov, čo dokumentujú aj publikované odborné a vedecké referáty.

doc. RNDr. Dagmar Sláviková, CSc.
vedúca projektu