Univerzita Mateja Bela v Banskej Bystrici
Fakulta prírodných vied
Katedra biológie a ekológie

Úvod do systémovej ekológie I

Od environmentálnej krízy k princípom ekologickej zložitosti a organizácie ekologických systémov

Peter Sabo, Peter Urban, Radovan Malina,
Juraj Švajda, Ingrid Turisová

BELIANUM

Banská Bystrica, 2020

Univerzita Mateja Bela v Banskej Bystrici
Fakulta prírodných vied
Katedra biológie a ekológie

Úvod do systémovej ekológie I

Od environmentálnej krízy k princípom ekologickej zložitosti a organizácie ekologických systémov

Peter Sabo, Peter Urban, Radovan Malina,
Juraj Švajda, Ingrid Turisová

BELIANUM

Banská Bystrica, 2020

Názov: Úvod do systémovej ekológie I. Od environmentálnej krízy k princípom ekologickej zložitosti a organizácie ekologických systémov.

Texty: Copyright © Peter Sabo, Peter Urban, Radovan Malina, Juraj Švajda, Ingrid Turisová

Autori textov: Ing. Peter Sabo, CSc., doc. Ing. Peter Urban, PhD., Mgr. Radovan Malina, PhD., Ing. Juraj Švajda, PhD., doc. RNDr. Ingrid Turisová, PhD.

Citácia: SABO P., URBAN P., MALINA R., ŠVAJDA J. & TURISOVÁ I. 2020. Úvod do systémovej ekológie I. Od environmentálnej krízy k princípom ekologickej zložitosti a organizácie ekologických systémov. Editor: P. SABO, Banská Bystrica: Belianum – vydavateľstvo Univerzity Mateja Bela, 286 s.

Recenzenti: prof. Ing. Ivan Vološčuk, DrSc., Tatranská Lomnica 66, 059 60 Vysoké Tatry

RNDr. Jan Plesník, PhD., Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Kaplanova 1931/1, 148 00 Praha 11 - Chodov

Ing. Ján Pavlík, PhD., Žilinský samosprávny kraj, Komenského 48, 011 09 Žilina

Foto na obálke: © Mgr. Martin Sabo, 2013, Kaukaz, pohľad na hlavný hrebeň z regiónu Svaneti.

Foto: © František Bača (P9 a), Zdeněk Bardon (úvod kap. 3, 3.1), Dobromil Galvánek (7.6. a, b), Ladislav Hamerlík (úvod kap. 5, 6.7), Stanislav Harvančík (5.11), Michael Hüttl (2.2, 3.3), Bruno Jakubec (5.11), Pavlína Mišíková (5.11), Michaela Murková (3.7), Monika Medovičová (7.1), Jan Plesník (4.5), Radoslav Považan (1.3), Ľudmila Sabová (úvod kap. 7, 7.4), Martin Sabo (úvod kap. 2, 3.5, 3.6, 5.11, 7.5), Peter Sabo (úvod, 2.2, 2.4, 2.6, 3.5, 3.7, 5.7, 5.9 a b, 5.11, 6.1, 6.4, 6.6 a, 6.9 a, 7.3, 7.14, P1 a, b, c, d, P9 b, c, d, Martina Škodová (6.6.b), Martin Štefánik (5.11), Ingrid Turisová (1.2), Peter Urban (1.4 a,b , úvod kap. 4, úvod kap. 6, 9 b, 7.10, 7.11, 7.13)

Foto Creative Commons a Public Domain: Meutia Chaerani & Indradi Soemardjan (4.8, CC BY 2.5), Hayden (4.7. a, CC BY 2.0), Oregon Caves (4.9. a, CC BY 2.0), InAweofGod'sCreation (4.9. b, CC BY 2.0), Leonard Wallentin Journalism++/EDJNet (2.8, CC BY 4.0), Alan Schmierer (5.5. b, Public Domain), Achmad Rabin Taim (4.7. b, CC BY 2.0), US Fish and Wildlife Service (úvod kap.1), Friedrich Georg Weitsch 1806, Wikimedia (2.3, Public Domain), Keith Williams (5.5. a, CC BY 2.0), WikiTravel (1.9, Public Domain)

Grafické schémy a mapy: © Vladimír Dobiaš (6.5), Radovan Malina (4.2, 4.4, 5.10), Lukáš Oršin (6.5), Ľubomír Repiský (7.7, 7.8, 7.9), Peter Sabo (1.1, 1.6, 2.1, 2.5, 2.7, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 5.1, 5.2, 5.5, 5.6, 5.8, 5.11, 5.12, 6.1, 6.3, 6.4, 6.5, 7.5, 7.7, 7.8, 7.9, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P10, P11), Správa CHKO BR Poľana (7.12), UNEP / GRID-Arendal & kartograf Hugo Ahlenius (6.2), Eva Wernerová (6.5)

Grafické schémy a mapy upravené podľa: Bantle, Wikimedia (3.9, Public Domain), Center for International Earth Science Information Network, Columbia University (4.6, CC BY 2.5), European Environment Agency, Kodaň (1.8, 2.9), Gunderson & Holling 2009 (6.8), Trenberth et al. 2009 (4.3), Mariana Riuz Villarreal (3.3, Public Domain), Our World in Data (7.2, CC BY 4.0), Repiský & Sabo (7.7), Rockström et al. 2009 & Steffen et al. 2015a (2.10), Kristian Molhave, The Opensource Handbook of Nanoscience and Nanotechnology (4.1, CC BY 2.5), UNEP / GRID-Arendal, kartograf Hugo Ahlenius (6.2), Wirtschaftsuniversität Wien 2018 (1.8)

Vydavateľ: Belianum. Vydavateľstvo Univerzity Mateja Bela v Banskej Bystrici, Tajovského 40, 974 01 Banská Bystrica, 2020, prvé vydanie, náklad 300 ks knižných výtlačkov a 150 ks CD.

Edícia: Fakulta prírodných vied. Schválila Edičná komisia Fakulty prírodných vied Univerzity Mateja Bela v Banskej Bystrici ako vysokoškolskú učebnicu pre študentov FPV UMB v Banskej Bystrici. Za jazykovú a odbornú stránku tohoto učebného textu zodpovedajú autori.

Tlač: EQUILIBRIA s.r.o.

ISBN 978-80-557-1728-9 (knižná verzia), ISBN 978-80-557-1734-0 (CD-ROM), ISBN 978-80-557-1735-7 (online)

Poznámka: Rámec učebného textu presahuje Príloha, ktorá z podstatnej časti vychádza z monografickej štúdie SABO et al. (2017) a do tejto učebnice bola zaradená kvôli úplnosti prehľadu, ako príklad jednej z možných ciest hodnotenia ekologickej zložitosti a integrity ekosystémov.

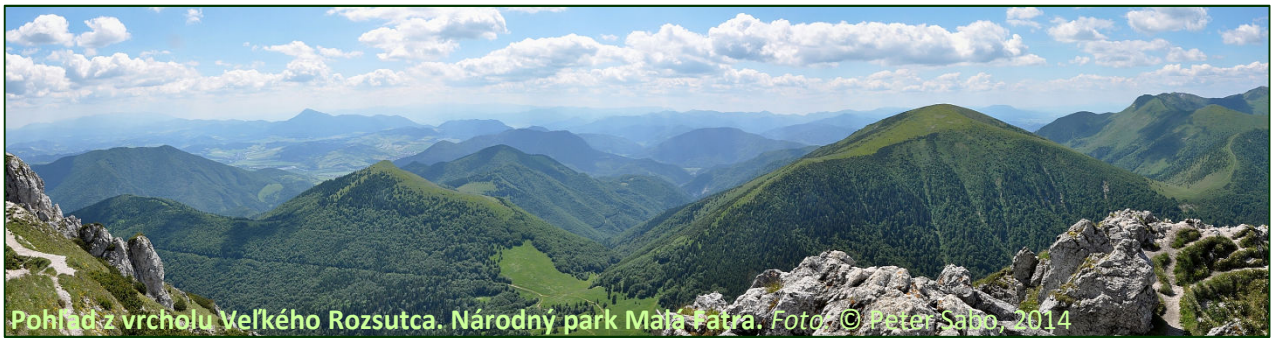
Upozornenie: Texty, fotografie, grafy a fotografie v tejto publikácii sú chránené autorským právom, s výnimkou tých fotografií, ktoré sú voľným dielom (Public Domain). Rešpektovať treba tiež licencie Creative Commons.

Linky na informácie o typoch použitých licencií: CC BY 2.0: https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/; CC BY 2.5: https://creativecommons.org/licenses/by/2.5/; CC BY 4.0: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Motto:

„Či nie je táto Zem pre nás všetkých pozemšťanov drahocenným domovom – sama v priestore, sama so svojimi systémami umožňujúcimi život, ovládaná nepochopiteľnými energiami, ktoré nám sprostredkováva za pomoci tých najcitlivejších úprav – rozmanito, nepravdepodobne a nepredvídateľne, ale tak, že sú pre nás životodarné, oživujú a obohacujú nás v najvyššej miere? Či si nezaslúži, aby sme ju milovali?

Barbara Ward a René Dubose: Len jediná Zem



Pohľad z vrcholu Veľkého Rozsutca. Národný park Malá Fatra. *Foto:* © Peter Sabo, 2014

Venovanie

Publikáciu venujeme našim rodinám a našim študentom, ekológom a ochrancom prírody, všetkým, ktorým nie je ľahostajná budúcnosť prírody a krajiny nášho kraja, Slovenska či Zeme. Prajeme si, aby sa odkrývanie systémových ekologických princípov stalo pre čitateľa zdrojom porozumenia zložitému svetu prírody, ale tiež inšpirácií k hľadaniu ciest ako čeliť súčasným veľkým environmentálnym výzvam.

Poďakovanie

Za odbornú spoluprácu, cenné rady a konzultácie ďakujeme (v abecednom poradí) prof. RNDr. Petrovi Bitušíkovi, CSc., RNDr. Šimonovi Budzákovi, PhD., Mgr. Silvii Cochovej, PhD., doc. RNDr. Svetlane Gáperovej, PhD., doc. RNDr. Ladislavovi Hamerlíkovi, PhD., RNDr. Antonovi Krištínovi, DrSc., Ing. Tomášovi Lepeškovi, PhD., Mgr. et MSc. Radoslavovi Považanovi, PhD., RNDr. Pavlovi Rapavému, Mgr. Anne Smetanovej, PhD., RNDr. Vladimírovi Smetanovi, CSc., RNDr. Petrovi Turisovi, PhD. a prof. Ing. Ivanovi Vološčukovi, DrSc.

Za odbornú a technickú spoluprácu pri realizácii projektu hodnotenia ekologickej zložitosti a integrity v oblasti Piešťan a Považského Inovca, ktorého čiastkové výsledky prezentujeme v Prílohe, ďakujeme Ing. Františkovi Bačovi, Mgr. Petrovi Demkovi, Mgr. Brunovi Jakubcovi, Mgr. Pavlovi Rauovi, Mgr. Aurelovi Rusnákovi, PhDr. Ľudmile Sabovej, Mgr. Martinovi Sabovi, RNDr. Zore Snopkovej, PhD., Mgr. Leontíne Striežovskej, PhD., Mgr. Petrovi Třískovi, PhD., Mgr. Martinovi Třískovi, PhD. a RNDr. Eve Uhliarovej, CSc.

Recenzentom publikácie (v abecednom poradí), Ing. Jánovi Pavlíkovi, PhD., RNDr. Janovi Plesníkovi, PhD. a prof. Ing. Ivanovi Vološčukovi, DrSc., úprimne ďakujeme za podrobné prečítanie rukopisu, cenné pripomienky a odporúčania, ktoré nám výrazne pomohli zvýšiť úroveň pôvodného diela.

Za bezplatné použitie fotiek zo súkromných archívov v tejto publikácii úprimne ďakujeme (bez titulov) Františkovi Bačovi, Zdeňkovi Bardonovi, Dobromilovi Galvánkovi, Ladislavovi Hamerlíkovi, Stanislavovi Harvančíkovi, Michaelovi Hüttlovi, Brunovi Jakubcovi, Pavlíne Mišíkovej, Michaele Murkovej, Monike Medovičovej, Janovi Plesníkovi, Radoslavovi Považanovi, Ľudmile Sabovej, Martinovi Sabovi, Martine Škodovej, Martinovi Štefánikovi a Petrovi Turisovi. Za bezplatné využitie máp ďakujeme Vladimírovi Dobiašovi, Lukášovi Oršinovi, Ľubomírovi Repiskému a Eve Wernerovej. Pre úplnosť uvádzame, že rovnako aj autori publikácie poskytli svoje fotografie, grafické schémy a mapy bezplatne.

Predložená učebnica bola vytvorená v rámci gantového projektu **KEGA č. 036UMB-4/2018** „Súčasná a systémová ekológia: štruktúra, dynamika a komplexita spoločenstiev a ekosystémov“, avšak texty a ilustrácie svojím rozsahom jeho pôvodné zadanie výrazne presiahli.

Obsah

ÚVOD **7**

1 ENVIRONMENTÁLNA KRÍZA, VEDA A PARADIGMA **9**

1.1 Základné pojmy: príroda, ekosystém, krajina, ekológia **10**

1.2 Od lovcov – zberačov ku globálnej environmentálnej kríze **13**

1.2.1 Postupný nárast vplyvov človeka na prírodu a krajinu 13

1.2.2 Rozvoj trvalo neudržateľný 16

1.2.3 Významné nepriame hybné sily globálnej environmentálnej krízy 18

1.3 Veda a potreba posunu paradigmy, význam ekológie **25**

1.3.1 Veda ako kľúčový fenomén dneška, vedecká paradigma 25

1.3.2 Dedičstvo mechanistického svetonázoru a bod obratu 27

Zhrnutie kapitoly 1 **30**

2 TEÓRIA SYSTÉMOV, ZLOŽITOSŤ ŽIVOTA A NARUŠENIE ZEMSKÉHO SYSTÉMU **33**

2.1 Od teórie systémov k biologickej a ekologickej zložitosti **34**

2.1.1 Vybrané z teórie systémov 34

2.1.2 Ilustrácia systémových historických koncepcií v biológii a ekológii 38

2.1.3 Ekológia a systémová ekológia 41

2.1.4 Čo je to zložitosť, komplexita prírodných systémov? 44

2.2 Globálne problémy v prizme Zemského ekosystému **47**

2.2.1 Od hypotézy Gaia k Zemskému ekologickému systému 47

2.2.2 Narušenie Zemského systému, planetárne hranice 49

2.2.3 Antropocén a riziko náhlej zmeny Zemského systému 55

Zhrnutie kapitoly 2 **57**

3 OD ATÓMOV K PRÍRODNÝM ZDROJOM A OBEHU HMOTY **60**

3.1 Stavebné kamene neživej a živej hmoty **61**

3.1.1 Základné stavebné kamene hmoty a rozpínajúci sa vesmír 61

3.1.2 Od molekúl k bunke, základnej organizačnej jednotke života 65

3.1.3 Prírodné zdroje v systémovej perspektíve 68

3.2 Obeh látok, život udržujúce cykly a ich narušenie **72**

3.2.1 Hydrologický cyklus a jeho narušenie 73

3.2.2 Cyklus uhlíka a jeho narušenie 77

3.2.3 Cykly dusíka, fosforu a síry a ich narušenie 80

Zhrnutie kapitoly 3 **84**

4 HYBNÉ SILY ŽIVOTA – ENERGIA A INFORMÁCIA **87**

4.1 Energia, insolácia Zeme a zonálnosť vegetácie **88**

4.1.1 Základné formy a kvalita energie, energetický systém Zeme 88

4.1.2 Podnebie (klíma) a klimatický systém 92

4.1.3 Zonálnosť (pásmovitosť) vegetácie 96

4.2 Termodynamické zákony a ich implikácie 101
4.2.1 Prvý termodynamický zákon a jeho environmentálne implikácie 101
4.2.2 Druhý termodynamický zákon a jeho environmentálne implikácie 105
4.3 Informácia ako prírodný zdroj, jej význam pre život 108
4.3.1 Genetická informácia 109
4.3.2 Kultúrna informácia 112
Zhrnutie kapitoly 4 113
5 PRINCÍPY ORGANIZÁCIE ZLOŽITÝCH ŽIVÝCH SYSTÉMOV 115
5.1 Celostnosť, chaos a zložitosť 116
5.1.1 Zložitý živý systém na hrane chaosu 116
5.2 Základné organizačné a regulačné mechanizmy 119
5.2.1 Od cyklov k spätným väzbám 119
5.2.2 Základné princípy autoorganizácie a autoregulácie 123
5.2.3 Polarita, ekologická rovnováha a symetria v prírode 126
5.3 Siete a hierarchie živých systémov, emergentné vlastnosti 130
5.3.1 Niektoré typy ekologických sietí, nelinearita a autopoiéza 130
5.3.2 Hierarchia živých systémov a ich emergentné vlastnosti 135
Zhrnutie kapitoly 5 140
6 EKOLOGICKÁ ZLOŽITOSŤ A NEROVNOVÁŽNA TERMODYNAMIKA ŽIVÝCH SYSTÉMOV 143
6.1 Od ekologickej zložitosti k ekologickej integrite 144
6.1.1 Hľadanie základných dimenzií ekologickej zložitosti 144
6.1.2 Od ekologickej stability k nerovnovážnej perspektíve 146
6.1.3 Ekologická integrita 149
6.2 Nerovnovážna termodynamika živých systémov 153
6.2.1 Termodynamická teória života a vývoja jeho zložitosti 153
6.2.2 Nerovnovážna termodynamika zložitých živých systémov 155
6.2.3 Environmentálne implikácie nerovnovážnej termodynamiky 162
6.3 Adaptívne vývojové cykly ekologického systému 164
6.3.1 Hollingov adaptívny vývojový cyklus a jeho fázy 164
6.3.2 Ekologický význam prírodných narušení a koncepcia panarchie 166
Zhrnutie kapitoly 6 169
7 REVÍZIA KONCEPCIE UDRŽATEĽNOSTI, EKOSYSTÉMOVÝ PRÍSTUP A OTÁZKY HODNOTENIA EKOLOGICKEJ ZLOŽITOSTI A INTEGRITY 172
7.1 Revízia koncepcie udržateľnosti 173
7.1.1 Tri základné argumenty pre revíziu koncepcie udržateľnosti 173
7.1.2 Koncepcia udržateľného sociálno-ekologického systému 178
7.1.3 Revízia koncepcie udržateľnosti na biofyzikálnom základe 181
7.2 Ekosystémové služby a ekosystémový prístup 185

7.2.1 Ekosystémové služby 185
7.2.2 Príklad mapovania a hodnotenia zmien ekosystémových služieb 187
7.2.3 Ekosystémový prístup a prizma ekologickej zložitosti pri manažmente ekosystémov 191
7.3 Niektoré východiská a možnosti hodnotenia zložitosti a integrity ekosystémov 200
7.3.1 Východiská hodnotenia ekologickej zložitosti 201
Zhrnutie kapitoly 7 204

PRÍLOHA: JEDNA Z MOŽNÝCH CIEST HODNOTENIA EKOLOGICKEJ ZLOŽITOSTI A INTEGRITY EKOSYSTÉMOV 208

P1 Použitá metodika 208
P1.1 Indikátory disipácie a využitia slnečnej energie 208
P1.2 Indikátory zložitosti kompozície a integrity ekosystému 210

P2 Prípadová štúdia hodnotenia ekologickej komplexity a integrity ekosystémov na úpätí Tematínskych vrchov 212
P2.1 Denné priebehy zložiek bilancie žiarenia a disipácie slnečnej energie 214
P2.2 Absolútna a relatívna účinnosť záchytu slnečnej energie 217
P2.3 Indikátory horizontálnej štrukturálnej zložky zložitosti a integrity 221

P3 Niektoré poznámky k hodnoteniu ekologickej zložitosti a integrity 226
Zhrnutie Prílohy 227

DOSLOV 229

MALÝ VÝKLADOVÝ SLOVNÍK 230

LITERATÚRA 257

ÚVOD

Ekologickým základom ľudskej prosperity sú prírodné zdroje, život udržujúce systémy a služby, ktoré nám poskytujú ekosystémy. Približne od roku 1950 však čerpanie prírodných zdrojov, produkcia odpadov a narúšanie najrozmanitejších ekosystémov exponenciálne rastú. Vplyvy človeka na prírodu a krajinu nie sú špecifikom našej doby, ale ich súčasný globálny rozsah a rýchlosť zmien ekosystémov a krajín sú bezprecedentné a posúvajú nás až ku hrane globálneho kolapsu. Reakciou sa stal nástup enviromentálneho hnutia a koncepcia udržateľného rozvoja, ktorá viedla k rozvoju environmentálneho práva, vývoju materiálovo a energeticky šetrnejších technológií, aj k vzniku nových inštitúcií. Početné miestne až regionálne zlepšenia stavu niektorých zložiek životného prostredia (v rozvinutých štátoch) však zatieňuje skutočnosť, že podľa bezpočtu vedeckých prác a správ svetových environmentálnych inštitúcií (napr. UNEP, FAO, IPCC) aj mimovládnych organizácií (napr. IUCN, WWF, BirdLife) devastácia Zeme ďalej narastá.

K príčinám (okrem známych fyzických hybných síl ako je napr. rast ľudskej populácie a spotreby, sociálnej asymetrie či rizík vyplývajúcich z moderných technológií) patrí aj nedostatočná reflexia vysokej zložitosti, komplexity biologických a ekologických systémov, ich vysokej rozmanitosti a súčasne ekologickej koherencie. Na druhej strane práve v ekológii sa už niekoľko desaťročí rozvíjajú koncepcie systémovej ekológie a ekosystémového prístupu, ktoré odkrývajú princípy organizácie a fungovania zložitých ekologických systémov. Tým otvárajú aj nové perspektívy ich udržateľného manažmentu.

Ekológovia sú si vedomí významu koncepcie zložitosti, problémom je jej uchopenie. Na jednej strane existujú sofistikované abstraktné matematické teórie s minimom aplikácií a na druhej strane je rozšírené všeobecné chápanie tohto pojmu bez precíznych definícií, ale s dôrazom na užitočné praktické výstupy. Nádejame sa, že potrebný stred medzi týmito krajnými prístupmi by mohla pomôcť budovať práve systémová ekologická perspektíva, ktorú sa v tejto učebnici snažíme priblížiť čo najzrozumiteľnejšie.

Učebnica Systémová ekológia je rozdelená do dvoch dielov. Nakoľko systémová perspektíva sa nezrodila vo vzduchoprázdne, považovali sme za potrebné v tomto prvom dieli spomenúť jej širšie východiská a súvislosti, začínajúc od súčasnej globálnej environmentálnej krízy cez princípy týkajúce sa organizácie hmoty od jej najnižšej po najvyššiu úroveň (vrátane biogeochemických cyklov), ako aj tokov energie, termodynamických zákonov, ktoré sú pre život kľúčové, a tiež základných princípov organizácie biologických a ekologických systémov (pre zjednodušenie obe skupiny nazývame živými systémami). Táto prvá časť vrcholí v priblížení koncepcie nerovnovážnej termodynamiky živých systémov, nadväzujúcich adaptívnych vývojových cyklov a náčrtu revízie koncepcie udržateľnosti na biofyzikálnom zákjlade, niektorých možností hodnotenia ekologickej zložitosti a ekologickej integrity systémov.

Tento diel je teoreticky náročnejší, pretože sa na limitovanom priestore pokúša zhrnúť základné aspekty organizácie a fungovania zložitých živých systémov. Ekologická zložitosť (ekologická komplexita) a ekologická integrita patria aj k teoretickým východiskám hodnotenia súčasných antropogénnych zmien ekosystémov a krajín. Predkladané koncepcie sme sa snažili nielen priblížiť, ale aj obohatiť o niektoré pôvodné teoretické idey, metodické postupy a praktické možnosti využitia. Keďže mnohé pojmy z tejto oblasti sú pre študentov a čitateľov nové, do tejto časti sme zaradili aj malý výkladový slovník.

Domnievame sa, že plánovaný druhý diel učebnice bude pre prírodovedca zrozumiteľnejší. V ňom budeme vychádzať viac z poznatkov súčasnej ekológie, od populácií cez spoločenstvá až po ekosystém. Opäť však budeme klásť dôraz na systémovú perspektívu a na predstavenie ďalších aspektov systémovej ekológie a nerovnovážnej termodynamiky, ktoré sme považovali za vhodné predstaviť až v druhom diele (napr. týkajúcich sa sukcesie a evolúcie ekosystémov ako zložitých a vysoko integrovaných celkov).

Obsah prvého dielu je nasledovný:

V kapitole 1 načrtávame postupný nárast vplyvov človeka na prírodu a krajinu, od lovcov – zberačov až po veľké zrýchlenie socioekonomického rozvoja a degradácie ekosystémov od roku 1950. Všímame si aj zlyhávanie koncepcie udržateľného rozvoja, ktorej chýba ekologický základ. Prehľad významných

nepriamych hybných síl krízy zahŕňa aj nedostatočnú reflexiu ekologickej zložitosti. S tým je spojený aj posun paradigmy aj vo vede, smerom od mechanistického redukcionizmu k systémovému mysleniu. V súvislosti s tým vzrastá význam ekológie aj systémovej ekológie ako inherentne systémových vied.

V kapitole 2 približujeme relevantné poznatky z teórie systémov, pričom si všímame aj vývoj systémových historických koncepcií v biológii a ekológii. Po vysvetlení rozdielov medzi obsahmi ekológie a systémovej ekológie približujeme podstatu modernej koncepcie zložitosti, komplexity, živých systémov. Aplikáciou systémovej teórie na najvyššej ekologickej úrovni je koncepcia Zemského ekologického systému. Približujeme aj jeho narušenie v kontexte novej koncepcie planetárnych hraníc.

V kapitole 3 načrtávame základné stavebné kamene neživej a živej hmoty – od elementárnych častíc a atómov, cez molekuly, organické zlúčeniny a gény sa dostávame až k bunke, základnej organizačnej jednotke života. Približujeme systémový pohľad na prírodné zdroje a prírodný kapitál. Kapitolu uzatvára pojednanie o biogeochemických cykloch ako súčasti život udržujúcich systémov. Osobitne sa venujeme vodnému cyklu, cyklom uhlíka, dusíka, fosforu a síry a ich antropogénnym narušeniam.

V kapitole 4 sa venujeme ďalším kľúčovým hybným silám života. Prvou je energia, osobitne slnečná a s ňou súvisiaci základný energetický systém Zeme, ktorý aj s využitím skleníkového efektu umožnil vznik života na Zemi a udržuje ho. Približujeme transport energie, klímu a s ňou spojenú horizontálnu aj vertikálnu zonálnosť vegetácie Zeme. K významným nástrojom systémovej ekológie patria aj dva hlavné termodynamické zákony, v kapitole približujeme aj ich významné environmentálne implikácie. V závere koncepciu prírodného zdroja rozširujeme o informáciu akumulovanú v krajine a v biosfére.

Kapitola 5 je venovaná hlavným princípom organizácie zložitých živých systémov, predstavuje základné autoorganizačné a autoregulačné procesy a mechanizmy, vrátane kladných a záporných spätných väzieb, približuje hypercykly, homeostázu a homeodynamiku, stručne aj princípy polarity a symetrie v prírode. V ďalšom približuje koncepciu autopoietických sietí ako kľúčovej organizačnej štruktúry živého systému. Od sietí sa dostávame k mnohovrstvovej hierarchii biologických a ekologických systémov a ku koncepcii holónu, ktorá vysvetľuje vnáranie systémov do systémov vyšších hierarchií.

Kapitola 6 je venovaná novým smerom systémovej ekológie – nerovnovážnej paradigme, otázkam ekologickej zložitosti a ekologickej integrity, najmä však koncepcii nerovnovážnej termodynamiky živých systémov, ktorá vysvetľuje ich bohatstvo a rozmanitosť na báze Prigoginovej teórie disipatívnych štruktúr. Úroveň disipácie slnečnej energie úzko súvisí so zložitosťou organizácie systémov. K ekologickým implikáciám koncepcie patrí aj vysvetlenie mimoriadnej zložitosti tropických pralesov. Kapitolu uzatvára pojednanie o adaptívnom vývojovom cykle ekosystému (Hollingov cyklus).

V kapitole 7 sa venujeme otázke revízie koncepcie udržateľnosti na biofyzikálnom základe, ktorú ilustrujeme na príklade negatívnych environmentálnych vplyvov moderného poľnohospodárstva a jeho možných ciest do budúcnosti v rámci udržateľného vývoja spoločnosti. Stručne načrtávame problematiku ekosystémových služieb, vrátane príkladu ich hodnotenia na báze tzv. maticovej metódy. Nasleduje ilustrácia princípov ekosystémovému prístupu a možnostiam ich priemetu do adaptívneho manažmentu ekosystémov ako aj náčrt možností hodnotenia zložitosti a integrity ekosystémov.

V Prílohe na príklade prípadovej štúdie približujeme niektoré možnosti odhadu ekologickej zložitosti a integrity ekosystémov. Zo širokého spektra používaných metód sme vybrali tie, ktoré vychádzajú z porovnávania účinnosti disipácie slnečnej energie rôznymi ekosystémami a z porovnávania hemeróbie vegetácie, pričom sme využili aj pôvodné vlastné indexy. Obe metódy sme overovali vo viacerých územiach Slovenska, tu uvádzame časť výsledkov získaných na úpätí Tematínskych vrchov v Považskom Inovci.

Posledná časť, ešte pred uvedením literatúry, je venovaná výkladovému slovníku odborných pojmov, ktorý by mal uľahčiť štúdium predkladanej učebnice.

A na záver pridávame malé prianie. Aj touto učebnicou by sme radi motivovali študentov a ďalších čitateľov k záujmu o túto pomerne novú, ale významnú interdisciplinárnu oblasť výskumu, ktorá leží v prieniku systémových, kybernetických, biologických, ekologických a environmentálnych vied. Budeme radi, ak prispejeme k prehĺbeniu záujmu čitateľa naučiť sa čítať a rozumieť úžasnej knihe prírody.

„Novú paradigmu môžeme nazvať celostným svetonázorom, ktorý vidí svet skôr ako integrovaný celok a nie ako zbierku izolovaných častí. Môžeme ju tiež nazvať ekologickým svetonázorom, ak pojem „ekologický“ použijeme v oveľa širšom a hlbšom zmysle ako je zvyčajné. Hlboké ekologické uvedomenie rozpoznáva vzájomnú závislosť všetkých javov, ako aj fakt, že ako jednotlivci aj spoločnosti sme vtkaní do (a definitívne závisíme od) cyklických procesov prírody.“

Fritjof Capra

1 Environmentálna kríza, veda a paradigma

V úvode týchto textov sa snažíme načrtnúť význam štúdia systémovej ekológie v kontexte postupného nárastu vplyvov človeka na prostredie a súčasnej globálnej environmentálnej krízy. Tento kontext dnes vytvárajú najmä kritické globálne problémy, ktoré sú prejavom prekročenia ekologických limitov život udržiavajúcich systémov. Načrtávame tiež dôvody, prečo je v tomto kontexte dôležité reflektovať aj vysokú zložitosť biologických a ekologických systémov a prečo venovanie sa tejto téme je súčasťou dnes tak potrebného (už prebiehajúceho) posunu paradigmy k systémovému a celostnému mysleniu.

Symfónia odbornosti a statočnosti Rachel Carsonovej

Rachel Carson (1907 – 1964), *Zdroj:* US Fish and Wildlife Service, Public Domain, Wikimedia.

Vplyvy človeka na prírodu a krajinu sa zvyšovali s tým ako rástla ľudská populácia, naše schopnosti vyrábať a používať nástroje na využívanie prírodných zdrojov a pretváranie krajiny, a ako rástla aj naša spotreba. Zhruba od roku 1950 sa prudko rastúci socio-ekonomický rozvoj premieta aj do rastúcej degradácie ekosystémov. Platí to aj o náraste používania a vplyvoch syntetických chemikálií, vrátane pesticídov.

Zhruba od 50. rokoch 20. storočia sa rozšírilo používanie insekticídu DDT (dichlórdifenyltrichlóretánu) ako prípravku proti škodcom v poľnohospodárstve a veľmi účinne aj proti komárom, ktoré v tropických krajinách prenášajú maláriu. V roku 1957 si však Stuart a Olga Huckins, milovníci vtáctva, ktorí chránili malé vtáčie „sanktuárium“ v mestečku Duxbury v USA všimli, že po leteckom postreku proti komárom ostali uhynuté včely a kobylky a značný počet uhynutých vtákov, o čom Olga napísala svojej priateľke, vtedy už známej biologičke Rachel Carsonovej.

Rachel Carsonová, autorka knihy „More okolo nás“ (*The Sea Around us*, 1951) pracovala na Správe USA pre ryby, voľne rastúce rastliny a voľne žijúce živočíchy (*US Fish and Wildlife Service*). Keď sa problémom začala zaoberať, zistila, že dovtedy neexistoval žiaden nezávislý výskum vplyvov pesticídov na životné prostredie. Výsledky svojho výskumu premietla do románu „Tichá jar“ (*Silent spring*, 1962), ktorý písala podľa jej vedeckých zistení, ale s cieľom aby závažnosti problému porozumela aj laická verejnosť. Kniha sa okamžite stala bestsellerom a jej varovanie zasiahlo vedcov, decíznu sféru aj verejnosť: *„Prvýkrát v histórii sveta je každá ľudská bytosť vystavená pôsobeniu nebezpečných chemikálií, od momentu počatia až po smrť... To, čím nás ohrozujú nové syntetické insekticídy, je ich nesmierna biologická potencia. Majú obrovskú moc nielen otráviť, ale vstúpiť do väčšiny životných procesov tela a zmeniť ich smrteľným spôsobom.“*

Reakcia chemických koncernov bola mimoriadne tvrdá, kritikou autorky nešetrila Národná poľnohospodárska chemická asociácia, Chemická korporácia Monsanto a k odsúdeniu diela sa pripojil aj časopis Time. Napriek tomu, že Carsonová ochorela na rakovinu, v syntéze jej odbornosti a statočnosti obhajovala výsledky svojho výskumu aj pred výbormi Senátu USA a zasadzovala sa za opatrenia na ochranu životného prostredia. Získala prestížne ocenenia Národnej federácie pre faunu a flóru, Národnej Audubonovej spoločnosti, medailu Alberta Schweitzera (ktorému Tichú jar venovala). Nedožila sa už toho, keď v roku 1972 USA zakázali používať DDT v poľnohospodárstve. Jej Tichá jar však bola zásadným prelomom. Prispela k vnímaniu prepojenia všetkého živého (autorke bol vlastný celostný pohľad), zodpovednosti vedcov za ohrozenie prírody človekom a k sformovaniu environmentálneho hnutia.

Upravené podľa: CARSON 1962; GODDARD-TAYLOR 2012; PRINCE 2012

1.1 Základné pojmy: príroda, ekosystém, krajina a ekológia

Slovo **príroda** sprevádza ľudskú civilizáciu už od jej úsvitu. Základom starogréckeho *fysis* je *fyo* – vznikám, rastiem, stávam sa, kvitnem, ktoré označuje zrodenie, rast, zmenu a vývoj. Aj latinské *Natura* znamenalo zrodenie, vznik a vývoj vecí, ale tiež povahu, prirodzenosť. V starovekom myslení príroda znamenala skôr vnútornú povahu prejavu života (LISICKÝ 1996). Až stredoveká filozofia začala rozlišovať medzi stvorenou prírodou, prírodninami a tvorivou prírodou, podstatou všetkých vecí (LISICKÝ 1996).

Postupne sa presadilo **vnímanie prírody ako hmotnej skutočnosti**, objektov, vzťahov a procesov, ktoré nevytvoril človek a ktoré existujú v nespočetných podobách a vstupujú do rozmanitých interakcií. Jedna z dnes najviac používaných definícií prírody bola prijatá na Konferencii OSN o životnom prostredí človeka (*United Nations Conference on the Human Environment*) v roku 1972 v Štokholme: „*Príroda je reálny svet, ktorý nás obklopuje a na ktorého vzniku sa nepodieľal človek, ale na ktorom je sám existenčne závislý*."

Neživá a živá príroda

Pojem príroda sa dnes používa najmä na označovanie jednotlivých **prírodných zložiek prostredia** – reliéfu, hornín, pôdy, vody, ovzdušia, klímy, rastlín, húb, živočíchov a mikroorganizmov. Pojem **neživá, anorganická príroda** označuje všetku neživú hmotu a energiu vesmíru. Na Zemi zahŕňa horniny a minerály, pôdu, vodu a ovzdušie, geotermálnu energiu, slnečnú energiu a jej rôzne transformácie (napr. veternú energiu, energiu tečúcej vody), ktorá sú výsledkom synergického pôsobenia slnečnej energie a zemskej gravitácie, ale aj energiu prílivu a odlivu, ktorá vzniká gravitačným pôsobením Mesiaca a Slnka.

Pod pojmom **živá príroda** chápeme živé organizmy a ich vzájomne prepojené systémy organizované do ekologických komplexov rôznych úrovní zložitosti a hierarchií: najmä populácií, spoločenstiev. V prípade ekosystémov, krajín a Zemského systému sa neživá a živá príroda dopĺňajú. V týchto komplexoch žiadne organizmy nemôžu existovať mimo ich prostredia, ktorého anorganické aj živé zložky navzájom rozmanitými spôsobmi interagujú, a práve tieto interakcie systematicky skúma **ekológia**.

Časti prírody (energie, látky a informácie), ktoré ľudská populácia využíva alebo môže využiť na uspokojenie svojich potrieb a záujmov nazývame **prírodné zdroje.** K hmotným prírodným zdrojom patria nerastné suroviny a palivá, pôda, voda, atmosféra, biomasa (a produkty z nej), ale aj biodiverzita. **Zo systémového pohľadu** však prírodné zdroje nemajú slúžiť výhradne človeku, ale v „zdravom" ekosystéme musia byť v rôznej miere k dispozícii všetkým živým organizmom. V tomto širšom pohľade je prírodným zdrojom všetko, čo konkrétny organizmus vyžaduje k svojmu prežitiu, rastu a reprodukcii.

Človek je súčasťou prírody, je od nej existenčne závislý a súčasne sa z nej svojimi aktivitami a kultúrou vyčleňuje. **Životné prostredie**, ako komplexný mnohozložkový časopriestorový systém, vytvára prirodzené podmienky pre existenciu živých organizmov. Jeho základnými abiotickými zložkami sú horniny a pôda, ovzdušie a klíma, voda a reliéf a k biotickým zložkám tradične patria rastliny, živočíchy, huby a mikroorganizmy (súčasné členenie bioty je zložitejšie a je predmetom intenzívneho molekulárno-genetického výskumu, napr. VESTEG et al. 2009; ADL et al. 2012). Život k svojej existencii potrebuje aj toky, transformácie a zásobníky energie. Verejnosť zatiaľ vníma životné prostredie skôr zúžene, najmä ako životné prostredie človeka, v systémovom ponímaní však zahŕňa celú biosféru. Pojem **prírodné prostredie** označuje tú časť životného prostredia, ktoré pozostáva len z prírodných prvkov, prírodnín.

Sféry Zeme, kľúčové pre život

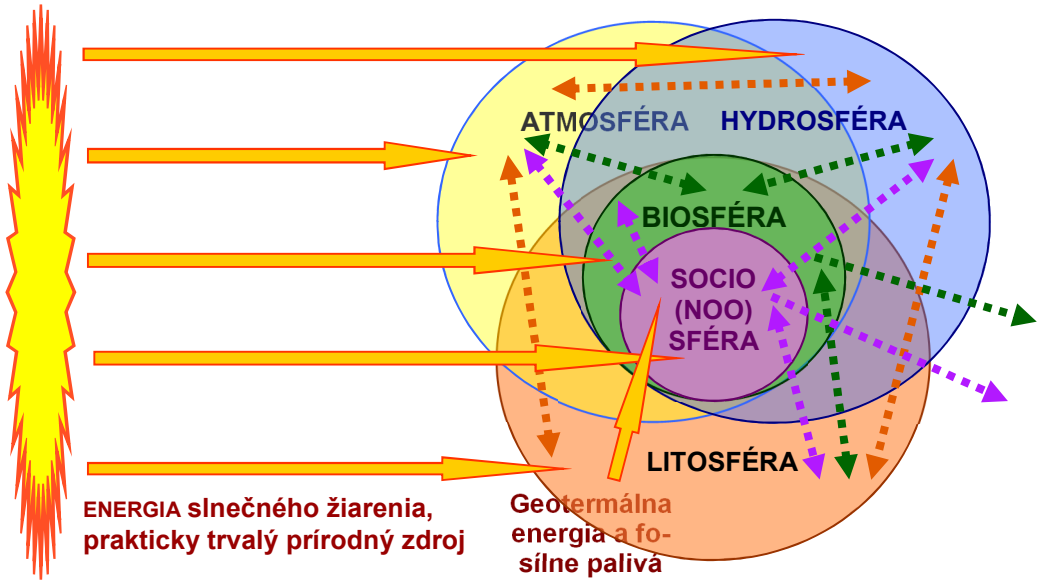
Život vznikol a vyvíjal sa na rozhraní niekoľkých vzájomne interagujúcich sfér, ktoré sú prostredníctvom tokov energie a biogeochemických cyklov integrované do globálneho Zemského systému.

Atmosféra je plynný obal Zeme, siahajúci do výšky niekoľko sto km, pripútaný k nej gravitačne a zúčastňujúci sa na zemskej rotácii. Je transparetná pre životodarnú časť slnečného žiarenia. Z neho získava teplo, ktoré spolu s vlhkosťou redistribuuje po zemskom povrchu. Funguje ako tepelný izolátor a skleníkový efekt udržuje teplotu na Zemi približne o 33 °C vyššiu než aká by bola bez neho. Poskytuje

aj hlavné stavebné prvky pre život organizmov: uhlík (C), vodík (H), kyslík (O) a dusík (N). Váhové pomery troch hlavných v nej zastúpených plynov sú: dusík (N) – 78,09%, kyslík (O) – 20,95%, argón (Ar) – 0,93%. Ďalšie plyny, vrátane oxidu uhličitého (CO_2), metánu (CH_4), oxidov síry, dusíka, vzácnych plynov a iné znečisťujúce látky sa v nej nachádzajú v podstatne nižších koncentráciách. Podľa svojich vlastností sa atmosféra delí na niekoľko koncentrických vrstiev, pričom jej hustota s výškou klesá.

Hydrosféra je nesúvislý vodný obal Zeme, zahŕňa vodu, ktorá nie je chemicky viazaná, vo všetkých jej formách: podstatnú časť predstavuje slaná voda morí a oceánov (97,2%), zo sladkej vody jej najviac viažu ľadovce a sneh (2,15%), nasleduje podzemná voda (0,63%), povrchové vody súše (jazerá, rieky, močiare, pôdna voda – 0,2%), voda v atmosfére (0,001%) a v živých organizmoch (0,0003%). Voda je podstatná pre život. Medzi hydrosférou, atmosférou, litosférou a biosférou je nepretržitý priestorový kolobeh vody, pričom celkové množstvo vody v hydrosfére je stále.

Litosféra je pevný vonkajší obal Zeme, rozdelený na pevninské a oceánske platne, pohybujúce sa po podloží. Jej mocnosť je 100 – 150 km pod pevninami a 60 – 70 km pod oceánmi. Zahŕňa zemskú kôru a najvrchnejšie časti zemského plášťa (leží na tenkej vrstve plastickej astenosféry). Vytvára pevnú platformu, podklad pre život, jej skaly nesú tenkú vrstvu pôdy, v ktorej sú výživné prvky dostupné pre rastliny. Endogénne a exogénne sily ju modelujú do horizontálne a vertikálne členených krajinných foriem, čoho výsledkom je rozmanitý zemský reliéf (jeho tvary a genézu študuje geomorfológia). Vrchná časť litosféry premenená pôsobením atmosféry, hydrosféry a pôsobením organizmov tvorí **pedosféru.** Analogicky, ďalšia časť zemského telesa trvale pokrytá snehom a ľadom sa nazýva **kryosféra.**



Obr. 1.1. Interakcie atmosféry, hydrosféry a vrchnej časti litosféry. Spolu s tokom slnečnej energie vytvorili podmienky pre vznik života a vývoj zložitých živých systémov v biosfére. V nej vznikla a rozvíja sa aj sféra ľudského rozumu a ľudských aktivít, tzv. noosféra. Schéma: © Peter Sabo.

Sférou s vhodnými podmienkami pre život je biosféra, ktorá zahŕňa všetky živé organizmy Zeme**.** Tento pojem prvý použil rakúsky geológ a paleontológ Eduard Suess (1831 – 1914) v roku 1875 a znamená priestor Zeme, časti litosféry, hydrosféry a atmosféry, ktorý je zónou života – spolu so všetkými živými organizmami a ekosystémami (DUVIGNEAUD 1988). Základnými životnými procesmi sú predovšetkým premena a slnečnej energie a jej transformácie v živej hmote prostredníctvom procesov fotosyntézy, respirácie a dekompozície. Podstatná časť biosféry zahŕňa povrch pevnín, oceány a prízemnú vrstvu atmosféry. Organizmy využívajú plyny atmosféry, vodu hydrosféry a živiny litosféry. Recentná biosféra, chápaná ako globálny zemský ekosystém (to znamená ekosystém najvyššej úrovne hierarchie) sa nazýva aj **ekosféra.**

Ruský vedec Vladimír Vernadskij v tejto súvislosti rozvinul pojem **noosféra** ako sféru ľudského rozumu, ktorý postupne pretvára biosféru (DUVIGNEAUD 1988). Chápe sa pod ňou ľudská spoločnosť a jej

výtvory, aj ľuďmi premenená časť biosféry. Problémom človeka je, že noosféra sa v posledných storočiach, najmä však od polovice 20. storočia stále viac rozvíja na úkor deštrukcie biosféry (obr. 1.1.)

Spoločenstvo, ekosystém, krajina, ekológia

Biologické spoločenstvo (biocenóza, z gréc. *„bios"* – život, *„koinos"* – spoločný) v širšom zmysle je zložitý rôznorodý živý systém, organizovaný celok tvorený populáciami všetkých na danom mieste a v danom čase žijúcich druhov rastlín, živočíchov, húb a mikroorganizmov (BEGON et al. 1997) a ich interakciami navzájom a s ich abiotickým prostredím. Ide o živú časť ekologických systémov, ktorá je relatívne nezávislá, stála a schopná samoregulácie, pričom sa v priebehu času mení jej vzhľad aj štruktúra. Podľa fyzických a biologických charakteristík sa v krajine odlišujú napr. spoločenstvá viatych pieskov, skalných štrbín, tečúcich vôd, atď. resp. rašelinísk, listnatých lesov, alpínskych lúk a pod. Spoločenstvá v užšom zmysle predstavujú štruktúrne časti biocenózy tvorené taxonomickými skupinami, napr. fytocenóza (spoločenstvo rastlinných populácií), ornitocenóza (spoločenstvo vtákov), malakocenóza (spoločenstvo mäkkýšov) a pod.

Zjednotením živých organizmov s ich prostredím vzniká ekosystém. Pojem **ekosystém** predstavuje vysoko organizovanú a dynamickú, často aj fyziognomicky rozpoznateľnú funkčnú entitu prírody. Jej živé prvky tvoria spoločenstvá rastlín, húb, živočíchov a mikroorganizmov, ktoré interagujú navzájom a tiež s ich abiotickým prostredím, s ktorým vytvárajú **integrovaný celok**. Ekosystém charakterizujú jeho hranice a fyzická štruktúra, vzájomné interakcie živých organizmov a ich interakcie s ich abiotickým prostredím, ako aj určitá dynamika jeho vývoja a prírodných narušení. Abiotické podmienky, biotické interakcie, sukcesia a prírodné disturbancie definujú ekologické nároky a funkčné postavenie druhov (ich ekologické niky). Obraz ekosystému dotvárajú toky a premeny energie v trofických reťazcoch, obeh živín a výmena genetických informácií. (TANSLEY 1935; ODUM 1977; BEGON et al. 1997; ELIÁŠ 2007).

Krajina je heterogénna časť zemského povrchu vymedzená podľa určitého kritéria, komplex vzájomne sa vzťahujúcich ekosystémov tvorených interakciou hornín, reliéfu, pôdy, vody, ovzdušia, rastlín, živočíchov a človeka (DEMEK 1999). Každá krajina má svoju genézu, ktorá definuje jej jedinečné prírodné a kultúrne charakteristiky a osobitný vzhľad (krajinný ráz)**. Prírodná krajina** vznikla prírodnými procesmi, so žiadnym alebo iba s minimálnymi vplyvmi človeka, často sa nazýva aj divočina. Takáto krajina sa zachovala už iba miestami v ťažko prístupných územiach. Krajina narušená človekom, ale so zachovalou prirodzenou vegetáciou sa nazýva **prirodzená krajina;** zmenená človekom je **kultúrna krajina**, ktorá má rôzne podoby – urbánna, poľnohospodárska, lesná, rekreačná a iná (BELČÁKOVÁ 2013).

Pojem **ekológia má rovnaké korene ako ekonomika** (z gréckeho *„oikos"* – domácnosť, domov, miesto pre život) a prvý ho definoval nemecký biológ Ernst Haeckel (1834 – 1919) v roku 1869 ako vedu o interakciách medzi organizmami navzájom a medzi organizmami a ich prostredím. Mnoho iných definícií ako predmet hlavného štúdia ekológie podobne zdôrazňuje vzťahy medzi organizmami, ako aj ich vzťahy s prostredím, vrátane adaptácií organizmov k ich prostrediu, ich priestorového a časového rozšírenia. Eugen ODUM (1977) hovorí, že **ekológia je veda o štruktúre a funkciách prírody**, čo SMITH (1996) ďalej rozvíja, že štruktúra zahŕňa distribúciu a hojnosť organizmov, ktoré ovplyvňujú abiotické a biotické faktory prostredia a funkcie zahŕňajú všetky aspekty ich rastu a interakcií ich populácií. (V súčasnosti je vo verejnosti aj s rôznymi záujmami a ideológiami, čo je však nesprávne a daný pojem zahmlieva, SKLENIČKA 2011).

Z ekologického hľadiska možno **environmentálny problém** definovať ako dôsledok takých ľudských aktivít, ktoré vedú k výraznému zhoršeniu kvality životného prostredia a tým často aj ľudského zdravia. Ku kritickým environmentálnym problémom dochádza, ak tlak na ekosystémy vedie k priblíženiu sa až k prekročeniu ekologických limitov, za ktorými ekosystémy už nie sú schopné spontánne vlastnými autoregulačnými mechanizmami sa vysporiadať s vplyvmi ľudskej činnosti a je nevyhnutný aktívny zásah človeka.

V tomto kontexte rastie aj význam **environmentalistiky** ako interdisciplinárnej vedy, ktorá sa zaoberá životným prostredím, vplyvmi človeka a riešeniami environmentálnych problémov. Cieľom je porozumieť ako človek vplýva na biologické a ekologické procesy, s cieľom predvídať následky ľudskej činnosti, ako základu prevencie a starostlivosti o životné prostredie a tiež obnovy degradovaných ekosystémov.

1.2 Od lovcov zberačov ku globálnej environmentálnej kríze

Napriek miestnym a regionálnym zlepšeniam stavu zložiek životného prostredia, ktoré priniesol rozvoj environmentálneho práva a technológií, degradácia životného prostredia postupuje. Na zvyšovanie jej rozsahu aj rýchlosti upozorňujú významné svetové environmentálne inštitúcie (napr. IUCN 2019, UNEP 2012, 2019, WWF 2016, 2018), aj tisíce prírodovedeckých štúdií.

1.2.1 Postupný nárast vplyvov človeka na prírodu a krajinu

Porozumieť týmto rastúcim vplyvom človeka na životné prostredie a hľadať systémové riešenia si vyžaduje aspoň letmé pristavenie sa pri etapách ľudskej histórie, ktoré sa odlišujú spôsobmi obživy. Po prevažnú časť svojej histórie na Zemi človek pretváral jej povrch zväčša iba v miestnom až regionálnom meradle, limitovali ho primitívne technológie, malá veľkosť ľudskej populácie a nízka spotreba.

Lovci-zberači

Prví kočovní **lovci-zberači** žili v tlupách, ktorých veľkosť obmedzovali limity lovu a zberu potravy a nízka priemerná dĺžka života. Ich väčší vplyv na životné prostredie nastal až po zdokonalení nástrojov a techník lovu a používania ohňa. Napriek tomu sa im pripisuje podiel na vyhynutí až 90 rodov vtedajšej megafauny v Eurázii, Severnej a Južnej Amerike a Austrálii (Brook & Bowman 2002; Koch & Barnosky 2006; obr. 1.2). Ako megafauna sa označujú druhy, ktorých jedinec váži v priemere aspoň 44 kg. Aj keď v tomto prípade okrem tlaku človeka treba brať do úvahy aj výraznú zmenu klímy (koniec doby ľadovej a nástup interglaciálu) a nízke reprodukčné schopnosti veľkých živočíchov (Braje & Erlandson 2013).

Neolitická poľnohospodárska revolúcia

Väčšiu energiu k pretváraniu prostredia človeku poskytla **neolitická poľnohospodárska revolúcia**, prechod od kočovného života lovcov-zberačov k prvým poľnohospodárskym spoločenstvám (začal približne pred 12 000 rokmi). Zmenu si vynútilo viacero faktorov: vyhynutie podstatnej časti megafauny, nástup klímy priaznivej pre šírenie a pestovanie obilnín a prispel k nej aj rozvoj remesiel. Pestovanie poľných plodín a ovocia začalo v trópoch a subtrópoch. Pôda získaná klčovaním lesov sa však po niekoľkých rokoch vyčerpala, čo viedlo k neustálemu posúvaniu osád a ku klčovaniu ďalších plôch pralesa.

Obr. 1.2. Rozsiahla premena krajiny na úpätí pohoria Psiloritis na ostrove Kréta. Pôvodný rastlinný kryt v Stredomorí, stálozelené lesy, tvorili najmä neopadavé druhy dubov, vavríny, olivovníky, ale i borovice a cédre (Zelený 2012). Už v staroveku bol však likvidovaný kvôli ornej pôde, pasienkom, plantážam olivovníkov, aj kvôli budovaniu sídel. K rozsiahlemu klčovaniu lesov prispela aj ťažba dreva a devastáciu dokonala silná erózia pôdy na strmých odlesnených svahoch.
Foto: © Ingrid Turisová, 2010.

Prechod k poľnohospodárstvu sa uskutočnil zhruba v rovnakom čase na viacerých miestach Zeme. Sedem (až desať) z nich sa považuje za hlavné centrá domestikácie rastlín, čo korešponduje so siedmimi hlavnými jazykovými kmeňmi, ktorých jazykmi dnes rozpráva 88 % ľudí (Diamond 2002). **Centrami domestikácie plodín** sú najmä oblasť „úrodného polmesiaca“ na Blízkom východe a Stredomoria, stredná a východná Čína, južná a juhovýchodná Ázia, východná Severná Amerika, Stredná Amerika, Južná Ame-

rika (najmä Andy a Amazónia), tropická Západná Afrika a Etiópia (DIAMOND 2002). Domestikácia živočíchov zahŕňala veľké bylinožravce a všežravce (napr. na Blízkom východe ovce, kozy, dobytok a ošípané).

Poľnohospodársku revolúciu a využívanie dreva ako paliva a na stavbu príbytkov, povozov a náradia sprevádzalo **rozsiahle odlesňovanie** (obr. 1.2) za účelom získania ornej pôdy a pastvín už pred zhruba 8 000 rokmi. Odlesňovanie v synergii s chovom dobytka už asi pred 5 000 rokmi viedli k malému zvýšeniu koncentrácie významných skleníkových plynov CO_2 a CH_4 v atmosfére (STEFFEN et al. 2004).

Prvé sídla a nové predindustriálne vplyvy

Viac dostupnej potravy a energie na osobu viedlo k vytváraniu prvých stálych sídel, k vývoju remesiel, vzniku spoločenských vrstiev a prvých civilizácií. Postupne rástla veľkosť ľudskej populácie (v roku 1700 dosiahla 600 miliónov). S potrebou nových plôch pre pestovanie plodín a pastvu dobytka **rástli aj vplyvy človeka na prostredie**, predovšetkým rozsiahle klčovanie a vypaľovanie lesov. Na strmých svahoch v oblasti Stredomoria dodnes vidno následky dávnej erózie pôdy. Neskoršie vplyvy zahŕňali najmä budovanie nádrží, zavlažovacích kanálov, vysušovanie mokradí, hnojenie vresovísk a iné.

K výrubom lesov prispievalo staviteľstvo, lodiarstvo a ťažba a tavenie rúd, s ktorou bolo spojené značné znečisťovanie vody a ovzdušia a vysoká produkcia nezužitkovaných materiálov ukladaných na banské haldy. Devastované boli lesy **okolo stredovekých banských miest** v Európe a krajinu poznačili rozsiahle odpadové haldy. Uhlie sa v Číne ťažilo už v 10., v Anglicku v 13. storočí, známe bolo znečisťovanie ovzdušia v Londýne (STEFFEN et al. 2007). K výrazným predindustriálnym vplyvom v Západných Karpatoch prispela **valaská kolonizácia** (v 14. až 17. storočí), klčovanie lesov za účelom rozšírenia pastvín pre dobytok tu viedlo k zníženiu hornej hranice lesa v priemere o 150 - 200 m (niekde až o 400 m), na 75 % jej dĺžky (MIDRIAK 2004). Avšak vplyvy poľnohospodárov boli aj pozitívne, patrí k nim napríklad vytvorenie tradičných malebných pastorálnych krajín s druhovo bohatými lúkami a pasienkami.

Od priemyselnej revolúcie k veľkému zrýchleniu

Ďalšou radikálnou zmenou bola **priemyselná revolúcia** (začiatkom druhej polovice 18. storočia v Anglicku), ktorú umožnili nové technické objavy a intenzívne využívanie energie fosílnych palív. Rozvoj manufaktúr, masovej výroby a nových technológií v priemyselne rozvinutých štátoch umožnil výrazné zvýšenie blahobytu. V druhej polovici 20. storočia odštartovala **zelená revolúcia** v poľnohospodárstve, ktorá na báze vysoko výnosných odrôd, agrochemikálií a mechanizácie zabezpečila podstatné zvýšenie produkcie potravín, tým aj migráciu ľudí do miest a vznik mnohomiliónových aglomerácií (obr. 1.3).

Obr. 1.3. Mestské megapolis ako mohutné betónové protuberancie industriálneho veku. Pohľad na ostrov Manhattan v New Yorku. Vznik a rozvoj obrovských miest s miliónmi obyvateľov umožnila v druhej polovici 18. storočia odštartovaná priemyselná revolúcia a s ňou spojená masová výroba. Súbežne rástli aj mestá, v ktorých od roku 2008 už žije viac ako polovica ľudstva. Sústredenie obyvateľstva v mestách šetrí krajinu, avšak vedie k vysokej spotrebe zdrojov a tiež k vysokej produkcii odpadov. *Foto:* © Radoslav Považan, 2005.

S rastom ľudskej populácie a jej spotreby postupovala aj **zmena krajinnej pokrývky**. Do roku 1950 bolo človekom narušených alebo zmenených približne 25-30 % zemského povrchu (STEFFEN et al. 2007). Ďalšie vplyvy zahŕňajú vysoké znečisťovanie ovzdušia v oblastiach ťažby surovín, priemyslu a veľkých mestských aglomerácií, rastúce čerpanie a znečisťovanie vody, vysokú produkciu odpadov, rozsiahle odlesňovanie za účelom získania nových plôch pre produkciu potravín, sídla, dopravu a priemysel.

Nové výkonné technológie výrazne znásobili schopnosť ľudskej populácie meniť a pretvárať krajinu.

Globálne zmeny sa prudko zrýchlili od roku 1950, označujú sa ako **veľké zrýchlenie** (*Great Acceleration* – STEFFEN et al. 2015b). Ide o vysoké zrýchlenie socio-ekonomického rozvoja, ktoré sa prejavuje exponenciálnym rastom ľudskej populácie a urbanizácie, globálneho hrubého domáceho produktu (HDP) a spotreby energie, medzinárodných investícií, produkcie minerálnych hnojív, čerpania vody a budovania priehrad, priemyselnej produkcie, dopravy, telekomunikácií a medzinárodného turizmu.

Toto zrýchlenie socioekonomického rozvoja sa však **premieta do veľkých environmentálnych zmien**. Patrí k nim napr. rast koncentrácií skleníkových plynov CO_2, CH_4, N_2O, teploty zemského povrchu, acidifikácia oceánov, vysoký výlov morských rýb (hoci tento sa už kvôli vyčerpávaniu zásob rybích populácií od konca 80. rokov 20. storočia nezvyšuje), rozsiahle výruby tropických pralesov, ubúdanie divočiny v krajine, znečisťovanie pobreží živinami a degradácia terestrických ekosystémov (STEFFEN et al. 2015b).

Súčasné vplyvy človeka na životné prostredie

Súčasné vplyvy človeka na životné prostredie a biodiverzitu sú veľmi rozmanité, rozsiahle a intenzívne (napr. VITOUSEK et al. 1997; SABO et al. 2011; WWF 2018; UNEP 2019; EEA 2019). Zahŕňajú degradáciu všetkých zložiek životného prostredia – pôdy, vody, ovzdušia a bioty.

Poľnohospodárska pôda zaberá 50 % obývateľnej rozlohy kontinentov, v Európskej únii 42 % (FAO 2019a; EEA 2019). Vzhľadom k tomu, že pôda hrúbky jedného cm sa môže v závislosti od podmienok tvoriť stáročia, pôda sa považuje za neobnoviteľný prírodný zdroj. Zmena krajiny a úbytok ekostabilizačných prvkov v nej (napr. remízok, alejí, medzí) urýchľuje **eróziu pôdy**. Orná pôda globálne čelí aj rozsiahlemu **zhutňovaniu, zamokreniu či vysúšaniu, zmenám pôdnej štruktúry a chemickým zmenám,** najmä okysľovaniu alebo naopak alkalizácii (najmä zasoľovaniu zavlažovaných polí v aridných oblastiach) a kontaminácii (najmä ťažkými kovmi a pesticídmi). Ďalším problémom je **dezertifikácia**, ktorá predstavuje najvyššší stupeň degradácie pôdy spočívajúci v silnom úbytku až strate jej funkcií a v konečnom štádiu vedie k premene krajiny na polopúšť alebo púšť. Šírenie púští už dnes zďaleka nie je iba problémom subsaharskej Afriky, Strednej Ázie alebo Číny. V južnej, strednej a východnej Európe sa riziko dezertifikácie týka 14 miliónov ha citlivých a zraniteľných území (UNEP 2016).

Problémom je aj **vyčerpávanie vodných zdrojov**, ktoré zvyšuje počet ľudí, ktorí trpia nedostatkom vody a vedie k tomu, že celá štvrtina veľkých riek sveta aspoň po časť roku nedotečie až k moru. V dôsledku súčasnej klimatickej zmeny sa počty ľudí, ktorí budú trpieť nedostatkom vody výrazne zvýšia. K hlavným procesom **znečisťovania vôd** patrí ich mikrobiologické a biologické znečistenie baktériami, vírusmi a inými patogénmi, plesňami a parazitmi, vysoký prísun živín, vysoká spotreba kyslíka pri rozklade netoxických organických odpadov (napr. hnojovice a močovky), znečistenie sedimentami, okysľujúcimi látkami, ťažkými kovmi, toxickými organickými látkami a rádioaktívnymi materiálmi. Do vôd sa tiež dostávajú rôzne mikropolutanty (najmä rezíduá z pesticídov, čistiacich prostriedkov, kozmetických prípravkov, liekov a pod.), pričom ich vplyvy na prírodu a na ľudské zdravie sú zatiaľ málo známe. Problémom je aj tepelné znečisťovanie vôd, ktorého zdrojom sú najmä chladiarenské okruhy tepelných a jadrových elektrární.

K primárnym polutantom ovzdušia patria najmä aerosoly, oxidy uhlíka, oxidy dusíka a amoniak, zlúčeniny síry, prchavé organické látky, ďalej halogény (najmä chlór, fluór, bróm a ich zlúčeniny), ťažké kovy a syntetické chemikálie, predovšetkým perzistentné a prevažne vysoko toxické organické polutanty, ktoré sa akumulujú v pletivách a v tkanivách organizmov. Vzájomnými reakciami primárnych znečisťujúcich látok, príp. aj za prítomnosti svetla vzniká v ovzduší množstvo ďalších zlúčenín – sekundárnych polutantov. S rastúcim znečisťovaním ovzdušia súvisí aj **globálna zmena klímy, stenčenie stratosférickej ozónovej vrstvy**, a v súčasnosti už pozorovaná aj acidifikácia oceánov.

K hlavným faktorom úbytku biodiverzity a degradácie životného prostredia patrí likvidácia, fragmentácia a degradácia prírodných a poloprírodných biotopov (napr. odlesňovanie – obr. 1.4, rozorávanie druhovo pestrých lúk, výstavba cestnej siete), ďalej nadmerné využívanie biologických prírodných zdrojov

(napr. nadmerné spásanie pasienkov veľkými stádami hospodárskych zvierat, ďalej nadmerný lov a rybolov), znečisťovanie biotopov živinami, cudzorodými látkami a inými typmi znečistenia. Vysoký prísun živín vedie k eutrofizácii pôd a ekosystémov stojatých a pomaly tečúcich vôd, podobne ako okyslenie (acidifikácia) negatívne vplýva nielen na terestrické a sladkovodné ekosystémy, ale aj na moria a oceány. Ťažké kovy a perzistentné organické polutanty vedú k intoxikácii organizmov v trofických reťazcoch, ekosystémy ohrozuje aj nástup inváznych druhov a postupujúca zmena klímy. Tlak globálnych trhov tiež vedie k značnému úbytku genetickej diverzity poľnohospodárskych plodín a hospodárskych zvierat.

Obr. 1.4. a) Tropický dažďový prales na juhovýchode Madagaskaru, Národný park Ranomafana (v preklade „*horúca voda*“) na rozlohe 416 km^2, v nadmorskej výške 800 – 1 200 m, hostí takmer štvrť milióna rôznych druhov, vrátanie niekoľkých stoviek vzácnych stavovcov, medzi nimi 12 druhov atraktívnych a ohrozených lemurov, či 110 druhov vtákov. Územie je súčasťou lokality Svetového dedičstva Dažďové pralesy Atsinananu (ktorú tvorí 6 národných parkov Madagaskaru), súčasne je aj v zozname ohrozeného svetového dedičstva. *Foto:* © Peter Urban, 2014.
b) Ryžové polia a svahy poznačené eróziou v odlesnenej Centrálnej vysočine (náhornej plošine) Madagaskaru. Tento štvrtý najväčší ostrov na svete už stratil možno viac ako 80 % svojich pralesov. Ide však iba o hrubý odhad, keďže odlesňovanie začali už pôvodní obyvatelia pred asi 2 000 rokmi. V 80-tych rokoch 20. storočia táto strata predstavovala približne 111 000 ha pralesa ročne. Problém je, že tempo odlesňovania tu neustále rastie. Odlesňovanie na Madagaskare podmieňuje najmä „*slash and burn*“ hospodárenie, ťažba dreva na produkciu paliva a drevného uhlia. Svet už stratil viac ako polovicu tropických pralesov, pričom globálne tempo likvidácie pralesov zatiaľ klesá iba veľmi pomaly. *Foto:* © Peter Urban 2014.

Z prírodnej krajiny tiež stále viac uberá zástavba, ktorá ju pokrýva nepriepustnými povrchmi, rozširovanie cestnej siete a globálne aj ornej pôdy, čím sa krajina vysušuje a prehrieva. Načrtnuté procesy degradácie pôdy, vody, ovzdušia a bioty sa nazývajú aj priamymi hybnými silami zmien ekosystémov (Nelson et al. 2006).

1.2.2 Rozvoj trvalo neudržateľný

Globálne problémy sú veľmi rozsiahle (tu sme ich iba stručne načrtli, podrobné pojednanie by si vyžiadalo samostatnú publikáciu) a navyše pôsobia v **synergii.** To znamená, že nepriaznivé procesy sa môžu vzájomne posilňovať (napr. zmena klímy aj dezertifikácia vedú k strate rôznych biotopov a tým k ohrozeniu druhov a úbytku biodiverzity) alebo aj zoslabovať (napr. zníženie následkov zmeny klímy zmeny v dôsledku vyššej odrazivosti slnečného žiarenia v atmosfére silne znečistenej aerosolmi).

Globálny nástup environmentálneho hnutia

Za kľúčový míľnik, ktorý zásadne podnietil nástup environmentálneho hnutia sa považuje práca biologičky **Rachel Carson**, najmä jej výskum a publikácie. Predovšetkým to bola jej kniha ***"Tichá jar"*** (*Silent Spring*), ktorý vyšiel v roku 1962 a v ktorom autorka varovala pred vysokými rizikami masového používania pesticídov, ktoré narúšajú veľmi jemné biologické mechanizmy (Carson 1962).

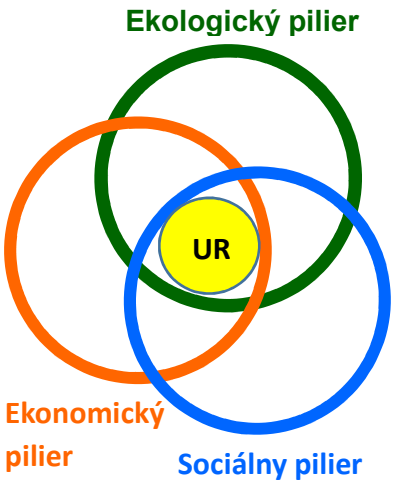
V roku 1972 boli publikované výsledky počítačového modelovania významných globálnych trendov: rastu ľudskej populácie, zabezpečenia výživy, priemyselného rozvoja, využívania prírodných zdrojov a znečistenia, ktoré realizoval Meadowsov tím ako súčasť výstupov Rímskeho klubu. Získané prognózy hovorili o riziku globálneho kolapsu v priebehu 21. storočia, ak budeme naďalej ignorovať **hranice rastu dané limitmi dostupnosti prírodných zdrojov Zeme.** *„Ak sa nezmení súčasný trend rastu svetovej populácie, industrializácie, znečistenia, produkcie potravín a čerpania zdrojov, limity rastu na tejto planéte budú dosiahnuté niekedy počas budúcich sto rokov.“* (cit. in NOVÁČEK & HUBA 1995).

V roku 1972 Edward GOLDSMITH (1928 – 2009) a ďalší editorio časopisu Ecologist publikovali *„Rukoväť pre prežitie",* rozoberajúcu prejavy a následky globálnej krízy. Upozornili, že **nielen ekosystémy, ale aj sociálne systémy čelia deštrukcii** a prvý raz použili pojem udržateľný (*sustainable*, GOLDSMITH et al. 1972). Podľa týchto autorov zásadným problémom v súčasnosti dominujúceho étosu expanzie a konzumného spôsobu života je ich ekologická a sociálna neudržateľnosť.

Koncepcia udržateľného rozvoja

V r. 1987 Svetová komisia pre životné prostredie a rozvoj pod vedením Gro Harlem Brundtland predložila správu **„Naša spoločná budúcnosť“**, ktorá zhodnotila globálny vývoj ako dlhodobo neudržateľný a ako kompromis navrhla koncepciu udržateľného rozvoja: *“Udržateľný rozvoj je rozvoj, ktorý zabezpečuje napĺňanie potrieb súčasných generácií bez toho, aby to bolo na úkor schopnosti budúcich generácií zabezpečiť svoje vlastné potreby”* (WCED 1991). Túto koncepciu prevzala aj **Konferencia OSN o životnom prostredí a rozvoji** (UNCED – *United Nations Conference on Environment and Development*) v roku 1992 v Rio de Janeiro (MŽP SR 1996). Jeden z jej výstupov, **Agenda 21,** už obsahovala konkrétne návody ako spojiť ďalší ekonomický rozvoj a boj proti chudobe s ochranou životného prostredia. Trochu neskôr prijalo Národnú stratégiu udržateľného rozvoja aj Slovensko (VLÁDA SR 2001) a tejto téme sa u nás venujú akademické inštitúcie aj environmentálne mimovládne organizácie (napr. MEDERLY 2001; HUBA 2006; PETROVIČ et al. 2007).

Táto koncepcia nabáda integrovať tri piliere udržateľnosti (NOVÁČEK 2010, obr. 1.5): **Environmentálny (resp. ekologický)** znamená ochranu biodiverzity a pôvodných ekologických procesov a zamedzenie znečisťovania prostredia. **Ekonomický pilier** zdôrazňuje produktivitu a efektívnosť, čo v praxi vedie k šetreniu a ochrane prírodných zdrojov. Prioritami **sociálneho piliera** sú bezpečnosť, ochrana zdravia, spravodlivosť a prístup k vzdelaniu. Ako ďalší pilier sa novšie uvádza aj **dobrá správa vecí verejných** (*good governance*).



Obr. 1.5. Tri základné piliere udržateľného rozvoja v štandardnom a široko používanom zobrazení. Riešenie, udržateľný rozvoj, by sa malo nachádzať v prieniku všetkých troch pilierov. Keďže však tieto piliere v skutočnosti nie sú od seba nezávislé, ale spočívajú na nosnom ekologickom pilieri je toto široko využívané zobrazenie silne zavádzajúce a prispieva k deformácii koncepcie udržateľného rozvoja.

Cieľom udržateľného rozvoja je integrovať tieto piliere do rozhodovania v socio-ekonomickej sfére (napr. DEMO et al. 2007) a do životného štýlu a konania ľudí. Zásadným problémom tejto koncepcie je, že uvedené piliere v nej vystupujú akoby boli vzájomne nezávislé, čo odporuje realite a vedie k mylným interpretáciám udržateľnosti ako prieniku týchto pilierov.

Aplikácia koncepcie UR prispela k rozvoju nových materiálovo a energeticky úspornejších technológií, pro-environmentálnych stratégií, aktivít a environmentálneho práva. Ilustruje to vyše 500 medzinárodných environmentálnych zmlúv, pričom 14 najdôležitejších globálnych dohovorov už ratifikovali takmer všetky štáty (UNEP 2012, 2019). Rýchly je nárast početnosti a rozlohy chránených území, ktoré v roku 2018 pokrývali 14,9 % rozlohy pevnín a 7,3 % rozlohy svetových oceánov (UNEP & WCMC 2018).

V súčasnosti je už v platnosti stratégia Agenda 2030 pre udržateľný rozvoj (*2030 Agenda for Sustainable Development*), prijatá Valným zhromaždením OSN v roku 2015. Táto stratégia definuje 17 cieľov udržateľného rozvoja (SDG – *Sustainable Development Goals*) a 169 opatrení k ich dosiahnutiu (UN 2015). Z hľadiska ochrany životného prostredia sú významné viaceré strategické ciele, ochrane biodiverzity morských a terestrických ekosystémov sa venujú predovšetkým ciele 14 a 15. Tomuto dokumentu však niektorí environmentalisti vyčítajú nižšiu konzistentnosť a najmä to, že jedným zo strategických cieľov je udržateľný ekonomický rast, čo sa dá chápať aj ako pokračovanie v doterajších ekonomických trendoch, ktoré ku kríze prispeli.

Zlyhávanie koncepcie UR, rozvoj dlhodobo neudržateľný

Koncepcia udržateľného rozvoja (UR) zabrzdila, ale nezastavila degradáciu životného prostredia a ekosystémov. K dôvodom patrí jej vysoká nejednoznačnosť až vágnosť (čo ilustruje až 300 rôznych definícií UR, DAVIES 2013), ako aj technokratická predstava, že na riešenie súčasných globálnych výziev stačí rozvoj vedy a techniky, efektívne vládnutie a spolupráca verejného a súkromného sektora (HECHT et al. 2012).

Samotný **pojem udržateľný rozvoj** (najmä ak je chápaný ako expanzia materiálovej spotreby) **je oxymoron**, to znamená, je inherentne rozporný (NOVÁČEK 2011). Neustály rast a expanzia totiž nie sú možné v žiadnom prostredí, ktorého zdroje sú konečné. S touto chybou súvisí aj používanie kontroverzných indikátorov, napr. až do r. 2018 nesprávne koncipovaného indikátora ľudského rozvoja (HDI – *Human Development Index*, podrobnejšie napr. SABO & COCHOVÁ, 2012b).

Aj hlavné posolstvo „Limitov rastu" znelo, že **nekonečný rast v konečnom systéme nie je možný.** Po vyše 40 rokoch je ešte aktuálnejšie ako v dobe vzniku. Pritom pred 40 rokmi autori nebrali do úvahy ďalšie globálne hrozby, najmä úbytok biodiverzity a zmenu klímy. V diele „*Limity rastu po 30 rokoch*" MEADOWS a kol. (2004) prezentujú 10 rôznych scenárov budúcnosti, po rok 2100. Väčšina z nich končí kolapsom v dôsledku vyčerpania zdrojov, nedostatku potravín, úpadku priemyslu, zdravotníctva a synergie rôznych faktorov. O tom, že ľudstvo sleduje najhorší zo scenárov Limitov rastu „*prístup ako doposia*ľ", svedčia vedcami zozbierané údaje, ich analýzy a prognózy (napr. TURNER 2008; RANDERS 2012).

Rozsiahla a rastúca likvidácia a degradácia ekosystémov, znečisťovanie ovzdušia, vody a pôdy, vyčerpávanie materiálových prírodných zdrojov (vrátane biomasy), nástup inváznych druhov a zmena klímy vytvorili **globálnu environmentálnu krízu**. Ide o bezprecedentný jav, kedy je ohrozená samotná budúcnosť našej civilizácie. Na zvyšovanie rozsahu aj rýchlosti tejto krízy dlhodobo upozorňujú svetové environmentálne inštitúcie (napr. IUCN 2019; UNEP 2012; 2019; WWF 2016, 2018), ako aj tisíce vedeckých štúdií. Ako sa uvádza v najnovšej správe Programu OSN pre životné prostredie (*UNEP – United Nations Environment Programme*) *„Zabezpečiť dôstojný život a prosperitu pre takmer 10 miliárd ľudí v roku 2050, bez ďalších kompromisov s ekologickými limitmi našej planéty a jej benefitmi, je jedna z najvážnejších výziev a zodpovedností, ktorým kedy ľudstvo čelilo."* (UNEP 2019).

V atmosfére smútku a žiaľu nad ničením prírody, ako aj rastúcich obáv z budúcnosti v kontexte postupujúcej zmeny klímy pribúda frustrovaných ľudí, pre ktorých sa znovu stávajú príťažlivé ilúzie prostých riešení a režimov pevnej ruky, čo je pre spoločnosť obrovské riziko. Aby sme sa im vyhli a hľadali skutočné riešenia – ktoré sú zložité, ako je zložitý náš svet – je potrebné vnímať ekologické, sociálne a kultúrne súvislosti a popri environmentálnych problémoch vidieť aj ich ďalšie hybné sily.

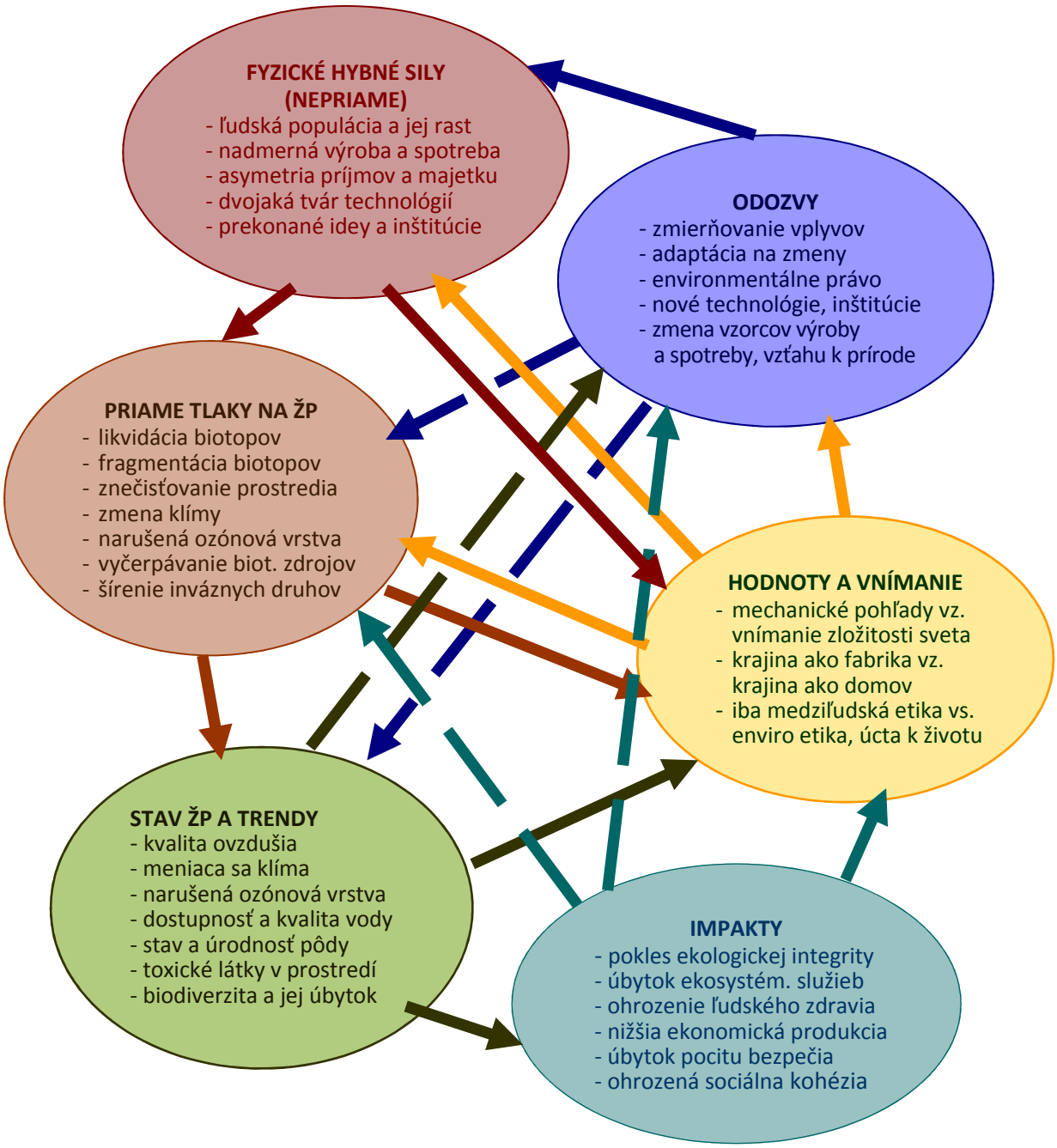
1.2.3 Významné nepriame hybné sily globálnej environmentánej krízy

Každá kríza je súčasne príležitosťou, výzvou lepšie porozumieť zložitému svetu okolo nás. K jej priamym hybným silám patrí najmä zmena využívania krajiny a s ňou spojená likvidácia a fragmentácia ekosystémov, znečisťovanie prostredia a jeho dôsledky, nadmerné využívanie ekosystémov (nadmerná pastva, ťažba dreva, lov a rybolov), nástup inváznych druhov a nových patogénov a zmena klímy).

Rozsah týchto procesov je taký obrovský, že je nutné zaoberať sa aj ich nepriamymi hybnými silami.

Aby sme priblížili širší kontext globálnej environmentálnej krízy, nižšie uvádzame výber a sumarizáciu jej nepriamych hlavných hybných síl (*indirect drivers*, MEA 2005). Tieto vychádzajú z tzv. **DPSIR rámca**, ktorý analyzuje hybné sily (*drivers*), antropogénny tlak (*pressure*), stav ekosystémov (*state*), dôsledky, dopady na ekosystémy *(impacts*) a odpoveď spoločnosti (*response*).

Na obr. 1.6 približujeme nami **modifikovaný DPSIVR rámec, rozšírený o hodnot**y, keďže tieto zásadne ovplyvňujú ľudské postoje a konanie. Počet hybných síl je samozrejme oveľa väčší ako nižšie uvádzame (podrobný rozbor uvádzajú napr. NELSON et al. (2006). Platí tiež, že v dôsledku vzájomných interakcií a zložitých spätných väzieb sa mnohé z týchto hybných síl vzájomne posilňujú (SABO & COCHOVÁ 2012).



Obr. 1.6. Náčrt interakcií medzi stavom životného prostredia a trendami jeho vývoja a rôznymi skupinami procesov, hybných síl a hodnôt, ktoré ho menia a ovplyvňujú. Výpočet položiek v jednotlivých kategóriách z priestorových dôvodov nie je úplný, treba ho chápať skôr ilustratívne. *Schéma:* © Peter Sabo, 2020, *námet podľa:* DPSIR (drivers – pressures – state – impacts – responses), DPSIR Analytical Framework for Integrated Environmental Assessment, MEA 2005, Ante Beck, Wikimedia, Creative Commons BY 3.0.

Veľkosť a rast ľudskej populácie

Kým v roku 1900 žilo na planéte iba 1,6 miliardy ľudí, **v roku 2020 vzrástla ľudská populácia na 7,8 miliardy**, pričom prognóza do roku 2050 sa blíži k 9,88 miliardy (PRB 2020). Svoj vrchol by mala dosiahnuť v druhej polovici 21. storočia, približne na úrovni 10 – 11 miliárd. Jej rast je však veľmi nerovnomerný, v súčasnosti sa z 98 % odohráva v rozvojových štátoch, ktoré zvýšili svoj podiel na obyvateľstve Zeme z 2/3 v roku 1950 na cca 5/6 už v roku 2018 a ktoré chcú zvýšiť aj životnú úroveň ich obyvateľov.

Napr. veľkosť africkej populácie sa má do roku 2050 zhruba zdvojnásobiť z terajších 1,39 na 2,56 miliardy (PRB 2020), čo výrazne zvýši environmentálnu záťaž tohto najchudobnejšieho kontinentu. Do polovice 21. storočia bude vo svete potrebné zabezpečiť potraviny, oblečenie, prístrešie a energiu pre ďalšie miliardy ľudí. A to ešte dnes žije na svete asi 800 miliónov hladujúcich ľudí (WORLD HUNGER 2015).

Dobrou správou je globálny pokles fertility z 2,8 v roku 2003 na 2,3 v roku 2020, avšak táto je stále vysoká v štátoch Subsaharskej Afriky, kde má hodnotu 4,8 (PRB 2020). **Vysoká fertilita** v rozvojových štátoch sa často spája s extrémnou chudobou a s nedostatočným zdravotníctvom, tiež s podriadeným postavením žien v spoločnosti, s ich nízkou vzdelanosťou a nízkymi možnosťami ekonomického uplatnenia, preto riešenie problému vysokého prírastku populácie si vyžaduje riešiť aj tieto príčiny.

Naopak, **v Európe fertilita klesla** až na 1,5, silne pod prah reprodukciu populácie (2,1) a do roku 2050 sa má populácia znížiť z terajších 747 miliónov na 729 miliónov (PRB 2020). Tento trend sprevádza aj starnutie obyvateľstva, čo zvyšuje nároky na zdravotníctvo aj na dôchodkové systémy. Rozdielne demografické trendy ako aj hlboké rozdiely v životnej úrovni obyvateľstva v kombinácii s postupujúcou zmenou klímy vysoko pravdepodobne povedú k vysokej imigrácii z Afriky a Ázie do Európy.

Rýchla urbanizácia

Rast populácie sprevádza **rastúca urbanizácia** – kým v roku 1975 žila v mestách iba približne 1/3 obyvateľstva, v roku 2018 to už bolo 55 % a v roku 2030 to má byť 60 % (v Európe je to už dnes 70 %). V roku 2050 budú žiť v mestách až dvaja z troch obyvateľov Zeme, pričom najrýchlejšie rastú mestá v Afrike a Ázii. Extrémne rýchly rast a rozširovanie miest je zjavné najmä v nízko príjmových štátoch: kým v roku 1990 existovalo len 10 megamiest (*megacities*) s počtom obyvateľov nad 10 miliónov a spolu ich obývalo 153 miliónov ľudí, v roku 2014 to už bolo 24 megamiest, s celkovým počtom 453 miliónov obyvateľov (ich najvyšší rast je v Číne, Indii a v Afrike). To nevyhnute sprevádza aj rast technickej infraštruktúry, ktorej objem sa má v priebehu najbližších 20 rokov zdvojnásobiť. (UNEP 2019.)

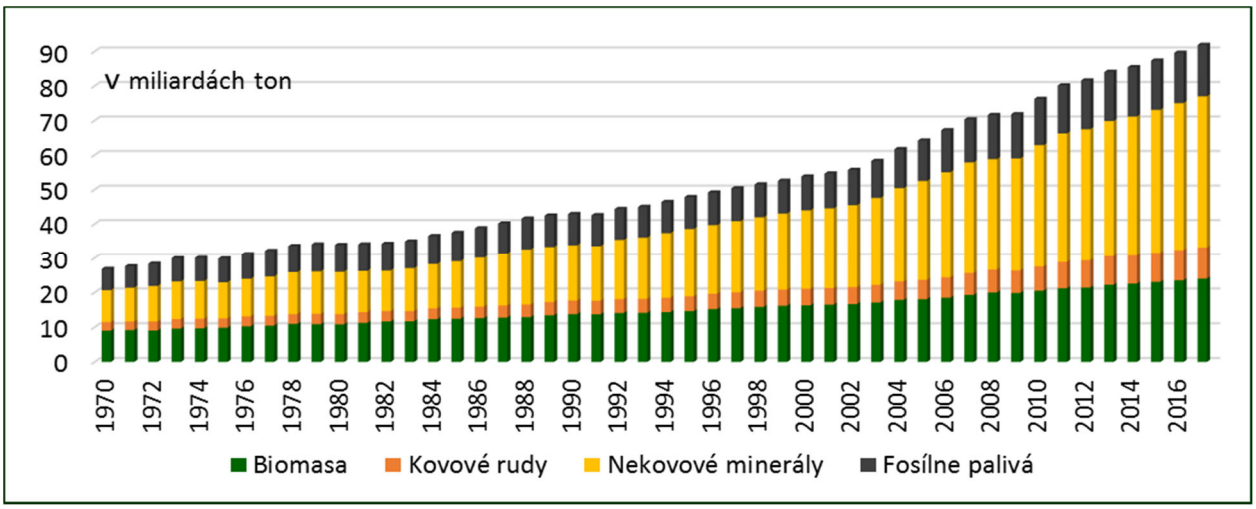
K hlavným príčinám urbanizácie patrí **migrácia ľudí z vidieka do miest**, často v dôsledku schudobnenia vidieka až zbedačenia farmárov a vidiny ekonomických príležitostí v meste, čo podporuje aj mediálny obraz konzumného životného štýlu. Mnohí migranti však nemajú potrebné vzdelanie a zručnosti aby v mestách uspeli a končia v slumoch, v ktorých žije až 1/3 globálnej populácie obyvateľov miest; v slumoch chýba základná infraštruktúra, voda a sanitácia, ale aj sociálna ochrana (UNEP 2019).

Koncentráciou ľudí v mestách sa šetrí priestor krajiny, čím ho ostáva viac pre voľnú prírodu. Mestá tiež priťahujú vzdelaných a kreatívnych ľudí, čoho dôsledkom je, že generujú technologické inovácie, ktoré umožňujú šetriť zdroje. Na druhej strane **veľké urbánne aglomerácie sú náročné na spotrebu materiálov aj energie** (spotrebúvajú až 75 % všetkej spotrebovanej energie), čo súvisí s vyššou úrovňou príjmov ich obyvateľov. Aj úroveň znečisťovania ovzdušia je v mestách (najmä chudobného Juhu) vyššia ako na vidieku, napr. mestá sú zodpovedné až za 70 % globálnych emisií CO_2 (UNEP 2011, 2019). Problémom veľkomiest je tiež rozširovanie do okolitej krajiny, suburbanizácia, keďže najmä bohatšie, ale aj stredné vrstvy obyvateľov vyhľadávajú zdravšie a príťažlivejšie vidiecke prostredie.

Okrem toho nárast počtu obyvateľov v mestách a mestských aglomeráciách, ich zmenený životný štýl ako aj postupne sa rozširujúce ponuky ďalších globalizačných aktivít, vedú k čoraz väčšiemu odcudzovaniu sa ľudí prírode. Americký ekológ a publicista Richard M. Pyle nazval tento jav výstižným termínom „vymieranie skúseností“ (e*xtinction of experience*) (PYLE 1993).

Rast spotreby materiálov a energie

Svetová ekonomika exponenciálne rastie, súbežne s tým sa však roztáča **špirála rastúcej spotreby, čerpania prírodných zdrojov a environmentálnej záťaže krajiny**. Od roku 1970 sa globálny hrubý domáci produkt (HDP) zvýšil o viac ako 300 % a medzinárodný obchod dokonca o 900 % (DIAZ et al. 2019). Prakticky neustále rastie využívanie všetkých skupín prírodných zdrojov, osobitne biomasy, kovových a nekovových minerálov a fosílnych palív (obr. 1.7). V 20. storočí globálne využívanie prírodných materiálov vzrástlo 8-násobne, na 59 miliárd ton ročne na prelome milénia a v roku 2017 presiahlo 90 miliárd ton ročne (WIRTSCHAFTSUNIVERSITÄT WIEN 2018). Privlastňovanie si čistej primárnej produkcie človekom vzrástlo do roku 2005 na 14,8 Gt (25 %, KRAUSMANN et al. 2013).



Obr. 1.7. Globálne toky (ťažba a spotreba) materiálov podľa štyroch hlavných materiálových skupín. *Zdroj údajov:* Wirtschaftsuniversität Wien 2018. Material flows by material group, 1970 - 2017. Vienna University of Economics and Business. *Graf:* Peter Sabo, podľa predlohy z rovnakého zdroja, *upravené*.

Dobrou správou je, že intenzita ťažby materiálov v prepočte na jednotku produkcie v dôsledku zavádzania efektívnejších technológií klesá, avšak rast ľudskej populácie a zvyšovanie životnej úrovne vedú k tomu, že globálna spotreba materiálov rastie. V tomto kontexte si treba uvedomiť, že nevyhnutné nie je šetriť iba neobnoviteľné zdroje, ale že aj čerpanie obnoviteľných zdrojov má svoje limity, nakoľko viaceré z nich sú vyčerpateľné a degradovateľné (napr. voda, biomasa).

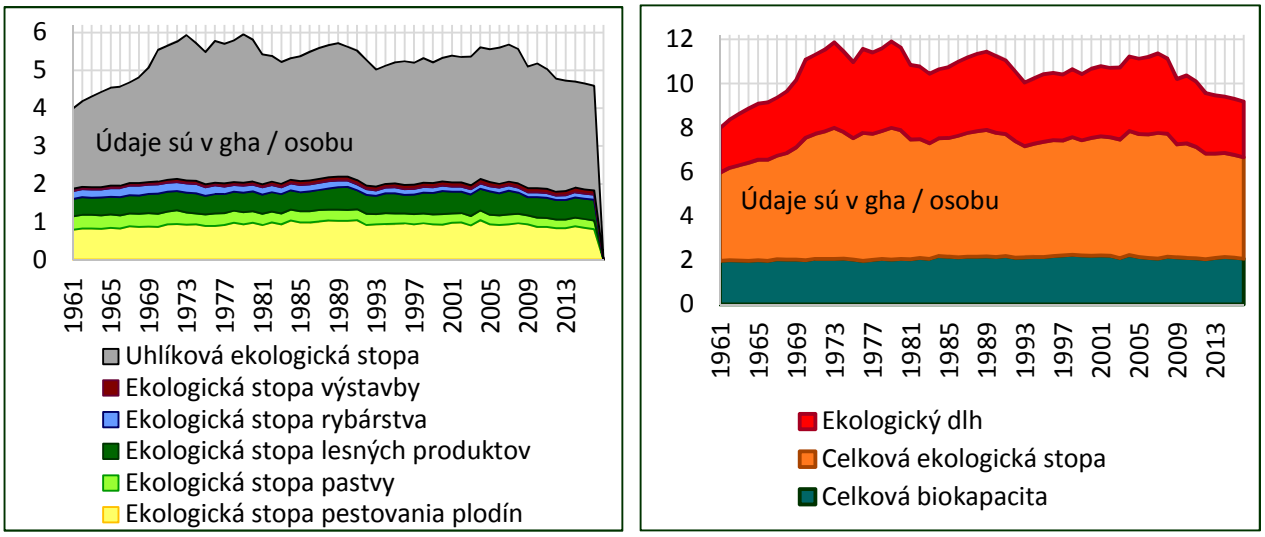
Ekologická stopa vz. biokapacita – život na ekologický dlh

Ekologická stopa vyjadruje rozlohu krajiny v tzv. globálnych hektároch (gha), ktorú jedinec alebo spoločnosť potrebuje na získanie všetkých ňou spotrebúvaných prírodných zdrojov a na absorpciu všetkých ňou produkovaných odpadov. Odhadovaná ročná biologická produkcia krajiny využívanej daným jedincom alebo spoločnosťou na čerpanie zdrojov alebo absorpciu odpadov (napr. absorpcia CO_2 lesmi), ktorá môže byť využitá bez toho aby dochádzalo k vyčerpávaniu zdrojov alebo k zmenám ekosystémov sa nazýva biokapacita. Neustály rast materiálovej spotreby vedie zhruba od 80. rokov minulého storočia k rastu asymetrie medzi ekologickou stopou väčšiny štátov a dostupnou biokapacitou ich územia.

V roku 2014 **globálna ekologická stopa** predstavovala v priemere 2,8 gha na osobu, kým **biokapacita Zeme** bola iba 1,7 gha na osobu (GFN 2018) – rozdiel 1,1 gha na osobu (64,8 %) predstavuje ekologický deficit zvyšujúci ekologický dlh, ktorý skôr alebo neskôr budú musieť splatiť budúce generácie (WWF 2016). Vývoj jednotlivých zložiek ekologickej stopy a biokapacity na území Európskej únie je na obr. 1.8.

V roku 2016 mali najvyššiu priemernú ekologickú stopu na osobu Katar (14,41 gha) a Luxembursko (12,91 gha), Spojené štáty mali stopu 8,11 gha a Slovensko 4,21 gha (GFN 2020). To znamená, že ak by všetci ľudia mali dosiahnuť životnú úroveň na Slovensku, potrebovali by sme tri ďalšie obývateľné Zeme, v prípade USA päť, Luxemburska osem a v prípade Kataru deväť. Štáty, ktoré majú značne vyššiu ekologickú

stopu ako biokapacitu musia prírodné zdroje alebo produkty z nich importovať. Bohatší „Sever“ v súčasnosti výrazne spotrebúva zdroje podstatne chudobnejšieho „Juhu“. To ilustruje, že dnes dominujúci socioekonomický model a s ním spojené vzorce výroby a spotreby **nie sú zdieľateľné všetkými**.



Obr. 1.8 a) Vývoj jednotlivých zložiek ekologickej stopy Európskej únie (1961 – 2016). b) Vývoj celkovej ekologickej stopy, biokapacity a ekologického dlhu EÚ (1961 – 2016). *Zdroj:* EEA 2020 (Európska environmentálna agentúra, Kodaň, Dánsko), *upravené*. *Zdroj údajov*: Global Footprint Network, National Footprint Accounts, https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/external/national-footprint-accounts-2018-edition

Rastúca príjmová a majetková asymetria

Podľa organizácie Oxfam International **v roku 2017 najbohatších 42 ľudí vlastnilo toľko majetku ako 3,7 miliardy chudobnejšej polovice ľudstva** (PIMENTEL et al. 2018). V tomto kontexte je zlou správou, že po desaťročiach znižovania počtu hladujúcich, ich podiel od roku 2015 viac menej stagnuje na 11 % svetovej populácie – 820 miliónov podvyživených v roku 2018, pričom v Afrike tento podiel dosahuje až 20 % (FAO 2019). Paradoxne, v bohatých štátoch Severu rastie podiel obéznych ľudí v populácii.

V období 2006 – 2015 príjmy bežných zamestnancov rástli zhruba o 2 % ročne, kým príjmy miliardárov rástli až o 13 % ročne, majetok viac ako dvoch tisíciek miliardárov vzrástol o 762 miliárd USD, kým u 50 % ľudstva stagnoval. Majetkové a príjmové rozdiely sa každoročne prehlbujú, čo vedie k strate dôvery a nádejí pre miliardy chudobných a nepriamo podporuje patologické sociálne javy, rozvoj zločinnosti aj nárast terorizmu. Príjmová a majetková asymetria je však značná aj vnútri štátov, napr. v USA traja najbohatší ľudia vlastnia toľko majetku ako polovica populácie (160 miliónov ľudí).

Navyše niektoré nadnárodné korporácie, presnejšie ich dodávatelia, zneužívajú **otrockú aj detskú prácu** v Afrike alebo v Ázii. Napr. v Bangladéši šičky pracujú 12 hodín denne a za rok zarobia iba 900 dolárov. Sprievodným javom je aj **marginalizácia miestnych domorodých spoločenstiev**, veľké rozvojové projekty sú neraz spojené s násilím, neoprávneným zatýkaním a zastrašovaním; kvôli týmto projektom sa ročne násilne presídli alebo pred násilím utečie približne 10 miliónov ľudí (GOODLAND 2008).

Neadekvátne ekonomické idey a politiky

Idea ekonomického rastu obstojí v rozvojových štátoch, kde až 783 miliónov ľudí musí vyjsť z príjmu menej ako 1,90 USD za deň (UNEP 2019). V rozvinutých štátoch je však iracionálna, pretože **nekonečný rast ekonomiky nie je možný v prostredí konečných zdrojov**. Ekonomický ideál aspoň 3%-ného ročného ekonomického rastu znamená, že HDP sa za 26 rokov zdvojnásobí, čo sprevádza aj rast materiálovej spotreby a produkcie odpadov. Napr. rast antropogénnych emisií CO_2 je v pozitívnej korelácii so zmenami globálneho hrubého domáceho produktu (GRANADOS et al. 2012). Dobré je, že viazanosť rastu HDP na materiálovú spotrebu už napr. v Európe klesá (*decoupling*), úplne ho odbúrať od tejto spotreby však nepôjde.

Asymetriu príjmov zvyšuje tlak na poskytovanie finančných stimulov (napr. vo forme štátnej pomoci a daňových prázdnin) nadnárodným korporáciám zo strany štátov, ktoré chcú na svoje územie prilákať ich investície alebo udržať tieto firmy na svojom území. Nevyhnutnou cenou za túto pomoc sú potom škrty verejných výdavkov, na ktoré chýbajú financie. V tejto súvislosti sú zaujímavé výsledky analýzy vzťahov v sieti 43 060 registrovaných nadnárodných korporácií (TNC – *Transnational Corporations*), podľa ktorých **až 80 % ekonomických tokov ovláda iba 747 vzájomne prepojených korporácií**, pričom ich užšie jadro, 147 TNC, ovláda 40 % globálneho trhu, pričom 75 % tohto jadra sú bankové inštitúcie (VITALI et al. 2011). (Tu treba uviesť, že pod chudobu obyvateľov rozvojových štátov sa často podpisuje aj rozsiahla korupcia.)

Globalizácia prináša nové ekonomické príležitosti, ale súčasne generuje ďalšie sociálne a environmentálne nerovnosti, pretože prírodné zdroje vo výraznej miere ovplyvňujú konzumenti v iných štátoch (DIAZ et al. 2019). Navyše mnohé ekonomické stimuly sú environmentálne škodlivé – napr. dotácie pre rybolov, fosílne palivá, ale aj niektoré obnoviteľné zdroje energie, ako je napr. spaľovanie dreva v elektrárňach na biomasu. (Napríklad Svetová banka sa stále podieľa na financovaní ťažby aj spotreby fosílnych palív.)

Chýbajúce globálne environmentálne inštitúcie

V kontexte globálnej environmentálnej krízy chýbajú globálne environmentálne inštitúcie, ktoré by boli protiváhou existujúcich svetových ekonomických inštitúcií ako sú napr. Svetová obchodná organizácia alebo Svetová banka, ktoré často **podceňujú environmentálne výzvy**. Napr. Svetová banka neraz presadzuje rozvojové projekty aj na úkor ekologických a sociálnych limitov (CONTRERAS-HERMOSILLA 2000).

Celosvetové mimovládne organizácie na ochranu prírody a prostredia (napr. IUCN, WWF, BirdLife International, World Resource Institute) nie sú partnermi globálnych ekonomických inštitúcií ani nadnárodných korporácií. Tento nedostatok čiastočne vyvažujú dohovory na ochranu biodiverzity a životného prostredia a Program OSN pre životné prostredie (UNEP, *United Nations Environment Progra*mme) a svetové medzivládne organizácie, ktoré patria pod OSN ako sú napr. Organizácia pre výživu a poľnohospodárstvo (FAO, *Food and Agriculture Organization*), Organizácia pre vzdelávanie, vedu a kultúru (UNESCO, *Educational, Scientific and Cultural Organization*), Medzivládny panel pre zmenu klímy (IPCC, *Intergovernmental Panel for Climate Change*), Medzivládny panel pre biodiverzitu a ekosystémové služby (*The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*) a ďalšie. Problém je, že UNEP ako program OSN má v hierarchii organizácie nižšie postavenie ako odborné agentúry OSN, ako sú napr. FAO a UNESCO.

Dvojaká tvár technológií

Vďaka moderným technológiám máme vyššiu produkciu potravín, lepšiu zdravotnú starostlivosť a kvalitu vzdelávania. **Každá technológia však má dve tváre**. Tá prívetivá je o tom, že moderné technológie znižujú spotrebu materiálov a energie na jednotku produkcie. Súčasne však veľmi uľahčujú intenzívne čerpanie prírodných zdrojov a rozsiahlu premenu krajiny. Príkladom je masívne odlesňovanie tropických pralesov, predovšetkým v juhovýchodnej Ázii (v súčasnosti už silne ohrozuje aj pralesy Amazónie).

Obr. 1.9. Ekologická katastrofa Aralského jazera (EEA 2003; Micklin 2007): Pred rokom 1960 obsahovalo štvrtý najväčší objem sladkej vody na svete. Čerpanie obrovských objemov vody z jeho z prítokov Amudarje a Syrdarje na zavlažovanie plantáží bavlny a ryže spôsobilo, že za 40 rokov sa plocha jazera zmenšila o 74 %, objem o 90 %, hladina sa znížila o 23 m a slanosť sa zvýšila na 50-100 $g.l^{-1}$. V dôsledku toho bol zlikvidovaný rybársky priemysel, ktorý zamestnával 60 tisíc ľudí. Na dne jazera sa dnes šíri slaná púšť Aral-kum. Nedostatok vody, slaný piesok a toxické chemikálie z dna roznášané vetrami postihujú krajinu na obrovskej rozlohe (domov 68 miliónov ľudí). *Foto:* Staecker. 2003. Wkimedia. Public Domain.

Ukážkou je tiež **regionálna ekologická katastrofa Aralského jazera**, ktoré sa v dôsledku megalomanských zavlažovacích projektov realizovaných na začiatku druhej polovice 20. storočia mení na soľnú púšť (obr. 1.9). Podobne aj na Slovensku za posledné dve desaťročia prudko rástla holorubná ťažba v lesoch, dokonca v národných parkoch, pričom sa neraz znovu vysádzajú ľahko zraniteľné smrekové monokultúry.

Problémom sú aj **existenciálne hrozby** obrovských síl, ktoré súčasná veda uvoľňuje bez toho, aby sme ich vedeli zvládnuť. Patrí medzi ne napr. umelá inteligencia, zbrane hromadného ničenia, nanomateriály, geneticky modifikované organizmy (GMO) a syntetická biológia, pri ktorej sa na rozdiel od GMO genetická informácia organizmu vytvára inžinierskymi postupmi celkom umelo, to znamená, že sa vytvárajú umelé biologické komponenty a systémy, ktoré v prírodnom svete neexistujú (BIO 2020).

Nedostatočná reflexia ekologickej zložitosti

Ekologická katastrofa Aralského jazera ale aj iné vedeckými analýzami podložené projekty demonštrujú, že **k príčinám degradácie biosféry patrí aj súčasná dominujúca vedecká paradigma,** ktorá podceňuje vysokú zložitosť ekologických systémov. Bohatstvo druhov, biotopov, ekosystémov a ich služieb pre spoločnosť by nebolo možné bez tejto vysokej zložitosti. Vytvárajú ju mnohoraké a početné vnútrodruhové a medzidruhové vzťahy, aj keď dnes ešte presne nevieme ako táto zložitosť vzniká. Rozmanité prírodné systémy Zeme vytvárajú rozsiahle štrukturálnej aj funkčne (behaviorálne) zložité anorganické, biologické aj ekologické siete a súčasne tieto siete budujú ešte zložitejšie hierarchické systémy, v ktorých sa uplatňuje synergia prírodných procesov, ich vzájomné prepojenia a ich určitá koherencia.

Vysoká zložitosť spôsobuje, že **správanie organizmov, populácií, spoločenstiev a ekosystémov je nelineárne,** čo sťažuje prognózovanie ich vývoja. A zvyšuje riziko náhlych až katastrofických zmien systému. Napr. zmena klímy neohrozuje život na Zemi, ale môže spôsobiť prechod Zemského systému do takého stavu alebo postupnosti stavov, ktorá bude pre ľudí vysoko nepriaznivá (Barnosky et al. 2012).

Navyše, **narušenia zložitých živých aj život udržiavajúcich systémov sa môžu vzájomne zosilňovať**: napríklad v prípade úbytku biodiverzity úbytok prírodných a poloprírodných biotopov súčasne znamená aj úbytok dôležitých absorbérov CO_2; podobne zalievanie krajiny betónom a asfaltom znamená prehrievanie umelých nevsiakavých plôch a prispieva ku globálnemu otepľovaniu (Turisová et al. 2010). Analogicky, klimatická zmena mení fenologické fázy, areály druhov, štruktúru ich biotopov, čo vedie k úbytku biodiverzity a súčasne znižuje kapacitu ekosystémových služieb (Thomas et al. 2004; EEA 2017). Za nepriaznivých klimatických a pôdnych podmienok môže viesť k vysokej strate vegetácie až k dezertifikácii.

Rast konzumu a nízka environmentálna etika

Moderný človek je pod tlakom reklám, plytkej zábavy a ideológií, ktoré ho presviedčajú, že zmyslom života je čo najväčšia spotreba a že jej zvyšovanie vyrieši aj naše osobné aj spoločenské problémy (Kohák 1998). Nič nie je pravde vzdialenejšie. **Konzumná orientácia** posilňuje také ľudské vlastnosti ako sú závisť, chamtivosť, strata solidarity s menej úspešnými, chorými a starými. Presadzujú sa tzv. korporátne hodnoty, ktoré človeka aj krajinu redukujú iba na nástroje tvorby zisku, rastie aj odcudzenie ku krajine.

V tomto kontexte rastie význam **environmentálnej etiky** ako súboru zásad, pravidiel a ašpirácií, ktoré by sme mali dodržiavať vo vzťahu k mimoľudskému svetu (Kohák 1998; des Jardins 2001). Táto etika zväčša prisudzuje prírodným objektom ich vlastnú hodnotu, nezávislú od ich úžitku pre človeka. V súčasnosti existuje viac prúdov – napr. **antropocentrizmus** vedie k správcovstvu prírody, **biocentrizmus** prisudzuje morálny status všetkým živým bytostiam, **ekocentrizmus** rozširuje etiku na prírodné spoločenstvo, zvyšuje sa vnímanie **divočiny** ako hodnoty, a **pluralistická etika** pracuje so spektrom rôznych hodnôt prisudzovaných živým bytostiam (Sokolíčková 2012; Palmer et al. 2014).

Vyznať sa medzi rôznymi prúdmi environmentálnej etiky a ich hodnotovými východiskami nie je jednoduché. Navyše bezprecedentný rozsah krízy vedie k výzvam odmietnuť ľudskú kultúru ako inherentne protiprírodnú a vybudovať od základu úplne novú pro-prírodnú kultúru (Šmajs 2006). Ešte radikálnejšie prúdy dokonca volajú po rozbití civilizácie a po návrate k lovcom-zberačom (Jensen 2006). História nás

však učí, že rozbíjanie toho, čo civilizácia dosiahla, nič neriešilo a naopak, neraz prinieslo obrovské útrapy.

Prehliadanie zložitých prepojení týchto hybných síl a prírodných, socioekonomických a kultúrnych procesov, ktoré ovplyvňujú, vedie k tomu, že namiesto príčin krízy zväčša riešime iba jej symptómy. Z uvedených hybných síl sa v ďalšom texte zameriame na tú, ktorá súvisí s nedostatočnou reflexiou ekologickej zložitosti, s cieľom prispieť k posunu vedeckej paradigmy smerom k celostnejšiemu vnímaniu života.

1.3 Veda a potreba posunu paradigmy, význam ekológie

Veda nie je jedinou cestou poznávania sveta, je však jedinečná v tom, že predstavuje úsilie o **systematické získavanie, spracovávanie, interpretovanie a overovanie poznatkov** o tom, ako funguje svet. Pozorovaniami, experimentami aj dedukciou odkrýva jeho tajomstvá, štruktúry, udalosti a procesy, vlastnosti a organizáciu, usporiadanie, ktoré nachádza v prírodných, sociálnych a technických systémoch. Prostredníctvom teórie aj empírie sa snaží predpovedať ich vývoj a umožniť ich riadenie.

1.3.1 Veda ako kľúčový fenomén dneška, vedecká paradigma

Moderná veda je matematicko - empirickým skúmaním fyzickej skutočnosti, zaznamenávaním a teoretickou systematizáciou pravidelných výskytov určitých javov (KOHÁK 1998). Popri pozorovaní, experimente a modelovaní, ktoré sú základom získavania údajov, je významná dedukcia vedeckých hypotéz, teórií a zákonov. Tie sú iba zriedka „navždy dané“, veda ich neustále overuje aj prepisuje tak, aby čo najlepšie odrážali skúmanú realitu. Zmyslom vedy je totiž hľadať pravdu o živote a vesmíre, o človeku a ľudskej spoločnosti. Základným princípom je objektívny prístup, snaha o minimalizáciu vplyvu subjektu (pozorovateľa) na výsledok experimentu a na dokazovanie teórie.

Moderná veda dosiahla od úsvitu priemyselnej revolúcie úspechy, ktoré zásadne rozšírili naše poznanie a zmenili náš vzťah k svetu. Umožnila úžasné zvýšenie materiálnej kvality života človeka (najmä zvýšením produkcie potravín, zabezpečením lepšej zdravotnej starostlivosti, prístupu k vzdelaniu, informačnými a komunikačnými technológiami, zvýšením mobility ľudí a iné). Postupne sa stala kľúčovou autoritou, ktorá formuje názory ľudí. **Poskytuje silné nástroje aj pre riešenie globálnych problémov,** napr. v otázkach rastu produkcie potravín, efektívnosti využívania prírodných zdrojov, znižovania znečistenia a produkcie odpadov, ale napr. aj v oblasti efektívneho spravovania chránených území.

Degradácia ekosystémov Zeme nás však núti vnímať, že aj veda má dve tváre a to, ktorá prevládne závisí od využitia jej výsledkov, čo nie je iba otázkou technológií, ale aj našich hodnôt, postojov a zodpovednosti. Navyše odcudzenie človeka od prírody vedie ku kríze vnímania, tým k oslabeniu jeho schopnosti samostatne sa orientovať v zložitom svete a rozhodovať sa na základe pozitívnych hodnôt (ROSZAK 1993).

Niektoré tienisté stránky modernej vedy

Exponenciálny nárast vedeckých poznatkov si vyžiadal vysokú odbornú špecializáciu, čo zefektívňuje vedeckú prácu aj aplikáciu vedeckého poznania. Úzka špecializácia však súčasne vedie k jeho silnej kompartmentalizácii, kedy si vedec z jedného odboru nerozumie s vedcom z iného odboru. Výsledkom je fragmentovaný obraz sveta, v ktorom sa stráca prepojenie všetkého živého aj neživého na Zemi. Preto stále viac vedcov poukazuje na **potrebu ekologizácie vedy** a opustenia jej dlhodobého dôrazu na využívanie prírodných zdrojov za účelom materiálneho rozvoja spoločnosti (WAKEFORD & WALTERS 1995).

Podľa C. ALVARESA (1995) **problémom je aj prepojenie vedy s politickou mocou.** Vízie vládnucich elít sú zväčša obmedzené dĺžkou volebných období resp. na zabezpečenie zisku v čo najkratšom čase. K hlavným omylom tohto prístupu patrí aj predstava, že kvalitu života ľudí zabezpečí konzumný raj a preto treba usilovať o neustály ekonomický rast. Degradácia ekosystémov a sociálnych vzťahov sa potom považuje za nevyhnutnú daň tohto rastu: *„Pri našej schopnosti prispôsobiť sa rýchlym zmenám sme stratili perspektívu času a rýchlosti. Kým domorodí obyvatelia Severnej Ameriky boli schopní uvažovať v časovom*

rámci, ktorý presahoval sedem generácií do minulosti a do budúcnosti, našimi prioritami sú ročné modely áut alebo šiat, štvrťročné dividendy, alebo iné platby." (Goldsmith in GORDON & SUZUKI 1994).

Ako sme už načrtli, **moderná veda tiež uvoľňuje obrovské sily,** ktoré spoločnosť na súčasnom stupni jej kultúrneho vývoja nie je schopná zvládnuť, napr. zbrane hromadného ničenia, produkcia toxických syntetických chemikálií, aplikácie GMO technológií, ktoré súvisia s rizikami kontaminácie pôvodných odrôd, kríženia GMO plodín s príbuznými druhmi, prieniku nových patogénov do prostredia a pod. Podľa slávneho fyzika Stephena Hawkinga či astronóma Martina Reesa sú vysoké riziká spojené aj s rozvojom umelej inteligencie, obavy jej vymknutia sa spod kontroly človeka alebo jej zneužitia, čo v kombinácii s vývojom autonómnych bojových robotov a technológií sledovania a kontroly ľudí vytvára nové existenčné riziká. K takýmto novým rizikám prispieva aj syntetická biológia.

K zneužívaniu výsledkov vedy prispieva aj odtrhnutosť stále viac pretechnizovanej spoločnosti od prírodného prostredia a strata pokory pred zložitosťou života a jeho tajomstvami. Podobne dôraz na oceňovanie výkonu jednotlivca a nie jeho reálnej služby pre spoločnosť ide ruka v ruke s kultiváciou egoizmu, chamtivosti a ďalších necností (SCHUMACHER 1974), čo v konečnom dôsledku znižuje kvalitu ľudského života: znižuje sa pocit bezpečia, rastie majetková a príjmová asymetria a eroduje ľudská solidarita.

Paradigma a jej posun

Vedecké teórie a nimi vytváraný obraz sveta sa dynamicky menia a prepisujú v súlade s novými pozorovaniami a objavmi. Napriek tomu aj vo vede poznáme obdobia ustálených poznatkov. KUHN (1962) **definoval paradigmu ako určitú množinu resp. sústavu vedeckých axióm, koncepcií, metodík a teórií** všeobecne prijímaných vedeckou obcou, ktorá vytvára základný rámec definovania problémov a hľadania riešení. **Paradigma je významnou súčasťou vedy a vedeckého svetonázoru**, keďže zložitosť prírodných aj socioekonomických systémov nás vždy núti k redukcii reality (KUHN 1962). Premieta sa aj do etiky a morálky, tiež do politiky v rozhodovacej (decíznej) sfére, kde ovplyvňuje stratégie, koncepcie, programy a projekty, ako aj z nich vyplývajúce praktické kroky a opatrenia na ich vyhodnocovanie.

Paradigma prijatá väčšinou vedcov sa stáva záväzným spôsobom prístupu ku problému. Vedecký výskum v období ustálenej paradigmy charakterizuje akumulácia poznania v tomto rámci – nové objavy sú akceptované iba vtedy, ak zapadajú do platnej paradigmy (čo má svoje výhody). Väčšina vedeckého výskumu spadá do dlhých období ustálenej paradigmy. Problém nastáva až vtedy, keď prevládajúca paradigma (súčasnou tej dnešnej je dominujúci redukcionistický svetonázor) prestane byť adekvátna realite a jej výzvam (CAPRA 1984). Takéto obdobie ilustruje narastajúci počet pozorovaní javov, ktoré v rámci starej paradigmy buď nemajú vysvetlenie alebo sú v priamom rozpore s etablovanými teóriami.

To otvára cestu zásadným inováciám teórií, ktoré sa snažia anomálie vysvetliť, pričom sa tieto môžu javiť ako radikálne. Nestačí aby nové teórie vysvetlili anomálie, ktoré sa vymykajú súčasnej paradigme, ale musia dôveryhodne vysvetliť aj všetky javy a otázky, ktoré vysvetľuje stará paradigma. Podľa KUHNA (1962) a GOLDSMITHA (1996) už v súčasnosti **žijeme v období posunu paradigmy**. K anomáliám, ktoré dnešná paradigma nevie vysvetliť patrí napr. neviditeľná „tmavá hmota" vesmíru, ktorá v ňom dominuje (prejavuje sa gravitačne, v udržiavaní galaxií a ich obrovských zhlukov – RUBIN 1998), ďalej *„optimálnosť"* základných fyzikálnych konštánt vesmíru, ktorá umožnila evolúciu a vznik života (REES 2004) ako aj vysoká dynamika a súčasne koherentnosť a určitá vnútorná synchronicita živých systémov.

Iným problémom súčasnej paradigmy je aj dominujúci **redukcionistický prístup** k skúmaniu sveta, ktorý sa vyhraňoval v 16. a 17. storočí (CAPRA 1984, 1997). Spočíva v dekompozícii celku na fragmenty, ktoré sa skúmajú oddelene a získané výsledky sa zlučujú. Tento analytický prístup je pre rozvoj poznania dôležitý, avšak zo zlučovania poznatkov o prvkoch zložitých systémov nezískame obraz týchto systémov ako funkčných integrovaných celkov, čoho dôsledkom je neúplný a fragmentovaný obraz sveta. Príkladom anomálie je aj spomínaná **iracionálnosť idey neustáleho ekonomického rastu**, ktorá napriek tomu, že nekonečný materiálny rast v prostredí konečných prírodných zdrojov Zeme logicky nie je možný, je stále motorom národných aj globálnej ekonomiky (RANDERS 2012).

V tejto súvislosti je významná **koncepcia postnormálnej vedy**, ktorá sa formuluje od začiatku 90 rokov 20. storočia a predstavuje úzke prepojenie vedy s rozhodovacími procesmi v zložitom kontexte neurčitosti nášho poznania zložitých systémov, vplyvu ľudských hodnôt a plurality perspektív, ktoré sú typické aj pre environmentálne problémy a mali by byť integrálnou súčasťou novej vedy (FUNTOWICZ & RAVETZ 1993; TOGNETTI 1999).

Kým tradičná veda sa zameriavala najmä na otázky využívania prírodných zdrojov, k prioritám postnormálnej vedy patrí prispôsobenie sa ľudskej spoločnosti prírode a udržateľný manažment ekologických aj sociálnych systémov. Využíva k tomu analýzu scenárov, matematické modely a iné postupy za účelom zníženia značnej neurčitosti, s ktorou sa vedecké disciplíny stretávajú, súčasne rešpektuje aj poznanie, hodnoty a legitímne záujmy miestnych komunít (FUNTOWICZ & RAVETZ 2003).

Navyše každá vedecká paradigma sa skôr či neskôr premieta aj do existujúcej etiky a morálky, vrátane nášho vzťahu k prírode. Dnes prevládajúci „exploatačný svetonázor" resp. **dobyvateľsko-koristnícky vzťah k prírode preto nezmeníme bez výrazného posunu paradigmy**. Pre pochopenie dôsledkov mechanického prístupu je preto nutný aspoň krátky exkurz do sveta jeho zakladateľov.

1.3.2 Dedičstvo mechanistického svetonázoru a bod obratu

Predstava stredovekého vedca o svete bola oproti dnešnej možno menej mechanická, avšak spútavali ho viaceré dogmatické obmedzenia, ktoré výskumu kládla svetská aj náboženská moc. **Zmena bola nevyhnutná a súvisela s rúcaním stredovekého svetonázoru** po Kolumbovom objavení Ameriky a s prevratnými vedeckými objavmi v 16. a v 17. storočí, ku ktorým patrí predovšetkým Koperníkova heliocentrická náuka, ktorá po jej potvrdení Galileovými pozorovaniami vesmíru vyvrátila starý Ptolemaiovský obraz geocentrického vesmíru (CAPRA 1984, 1997).

V tomto období vznikli významné diela, napr. Galilea, Bacona, Descarta, Newtona, ktoré boli reakciou na stredoveký dogmatizmus. Problém je, že viaceré z nich, vo svojej dobe veľmi pokrokové a prínosné, už nestačia na riešenie dnešných globálnych výziev, preto je dnes už opodstatnený aj kritickejší pohľad na ne (napr. CAPRA 1984; CLARKE 1993; ROSZAK 1993; KOHÁK 1993; GOLDSMITH 1996).

Niektoré významné postavy stojace pri zrode súčasnej paradigmy

Galileo Galilei (1564 – 1642), taliansky filozof, fyzik, astronóm a matematik, jeden zo zakladateľov experimentálno-teoretickej prírodovedy, tvrdil, že dôležitými vlastnosťami prírody sú iba tie, ktoré sa dajú merať a kvantifikovať (napr. veľkosť, tvar, počet a pohyby telies), kým vlastnosti vnímané zmyslami (napr. farba, chuť, zvuk, pach) považoval len za nevýznamné subjektívne obrazy (CLARKE 1993). Príroda má byť skúmaná len pomocou technických zariadení a **na báze exaktnej matematiky**. Dnes však už vieme, že zložitosť vesmíru je podmienená aj tým, že v ňom prebiehajú nielen deterministické, ale aj stochastické (náhodné) procesy, všetko sa zmerať nedá a preto sú nutné aj naratívne opisy (KAY 2000). Navyše, aj autentická zmyslová ľudská skúsenosť a vnímanie krásy majú v poznávaní svoje miesto.

Francis Bacon (1561 – 1626) anglický právnik, generálny prokurátor, lord kancelár Anglicka a filozof kritizoval vtedajšiu vedu, najmä, že sa často robila dedukcia z celkom nedostatočných údajov, a zdôrazňoval význam empírie, experimentu a následnú indukciu všeobecnejších poznatkov (SCOTT-KAKURES 1999). Problémom jeho odkazu je, že prioritnou súčasťou jeho vízie bolo ovládnutie prírody: *„Ak sa človek bude snažiť o upevnenie a rozšírenie moci nad celým vesmírom, jeho ambícia... je bez pochýb úplnejšou a noblesnejšou úlohou... Nech len ľudská rasa obnoví svoju vládu nad prírodou, ktorá jej podľa božského odkazu prináleží, nech dostane moc."* (BACON in CLARKE 1993). Táto **koncepcia neľútostnej dominancie nad prírodou** síce umožnila enormne zvýšiť materiálne bohatstvo, avšak stala sa tiež pilierom drancovania prírodných zdrojov aj zotročovania prírodných národov. Baconov podpis nesie aj oddelenie výskumu od hodnotových kategórií a už spomínané spájanie vedy s mocou.

René Descartes (Cartesius, 1596 – 1650), francúzsky matematik a zakladateľ novovekej filozofie, vychádza z kritickej pochybnosti o dovtedajšom poznaní, s cieľom dopátrať sa pravdy, o ktorej už niet pochybností. Súčasne však položil aj základ **mechanistického svetonázoru**, podľa ktorého prírode možno plne porozumieť pomocou **analógie s fungovaním hodinového stroja**: *„Celú Zem a celý viditeľný vesmír som opísal na spôsob stroja... Jediný rozdiel, ktorý vidím vo fungovaní strojov a prírodných objektov je ten, že prácu strojov poháňajú zariadenia, ktoré sú dostatočne veľké, aby sme ich zaregistrovali svojimi zmyslami."* (DESCARTES in CLARKE 1993). Vo svojej *Rozprave o metóde* odporúča skúmať aj zložité celky metódou analýzy, ktorá spočíva v redukcii skúmanej skutočnosti na malé logicky usporiadané komponenty a v zlučovaní o nich získaných poznatkov (DESCARTES 1992).

Analýza je legitímna a dôležitá vedecká metóda, avšak má svoje limity, pretože organizmy ani ekosystémy nie sú analógiou mechanického stroja. Podľa niektorých autorov (CAPRA 1984, 1997; ROSZAK 1993, SABO et al. 2011b) práve mechanická predstava života spolu s karteziánskou dichotómiou medzi hmotou a mysľou patrí ku koreňom dnešnej krízy. Po niekoľko stáročí ospravedlňovala koristnícky prístup k prírode, ako aj hrubé zaobchádzanie so zvieratami, v minulosti dokonca aj s prírodnými národmi.

Isaac Newton (1642 – 1727), anglický fyzik, matematik i filozof, geniálny objaviteľ gravitačného zákona, vysvetlil pohyb telies v priestore. V súlade s učením Koperníka a Keplera dokázal, že planéty našej slnečnej sústavy sa pohybujú po vypočítateľných dráhach, to znamená, že v konečnom dôsledku pri obehoch okolo Slnka fungujú ako akýsi obrovský Descartov hodinový stroj (CAPRA 1984; CLARKE 1993). Newton samozrejme nemal zámer zredukovať obraz nášho pestrého a rozmanitého sveta, avšak postupné **aplikácie princípov jeho mechaniky aj na svet živej prírody,** zredukovali organizmy, ekosystémy aj človeka iba na stroje. Novou paradigmou sa stal pohľad na vesmír a život ako na gigantický mechanický stroj.

Tieto nové racionálne idey viedli k nástupu modernej vedy a techniky a k bezprecedentnému nárastu materiálneho blahobytu západnej spoločnosti. Ako prvé **na obmedzenia mechanistickej paradigmy poukázali objavy kvantovej fyziky** (napr. objav, že subatomárne častice majú pravdepodobnostné správanie), aj **Einsteinova teória relativity** (ktorá spojila priestor a čas do časopriestoru, mimo ktorého tieto premenné nemajú zmysel). V posledných desaťročiach k nim pribudli objavy z oblasti zložitosti a nerovnovážnej termodynamiky (napr. reinterpretácia druhého termodynamického zákona pre živé systémy). Tiež, ako dokumentuje ontogenetický aj fylogenetický vývoj, aj ekologická sukcesia, **pre organizmy ani ekosystémy neplatí princíp reverzibility,** ktorý je napr. významnou súčasťou teórie gravitácie. Naopak, biologické a ekologické procesy nie sú reverzibilné.

Príklad redukcionizmu v biológii

Problémom nie je redukcionizmus, ktorý je legitímnou metódou vedeckého výskumu, ale stáva sa ním až jeho absolutizácia. Ilustráciou je napr. **výklad génocentrického pohľadu na evolúciu** od britského biológa Richarda DAWKINSA (*1941), podľa ktorého sú rozhodujúcimi aktérmi evolúcie tzv. „*sebecké gény*". DAWKINS (1998) im tým určite nechcel priradiť mentálnu schopnosť, ale vníma ich ako replikátory, ktoré akoby sledovali výlučne iba svoj záujem, a tým riadili organizmy k vopred determinovanému správaniu. Podľa tejto teórie sú objektom evolučného výberu predovšetkým gény, organizmy sú plne podriadené génom a akoby postrádali iný zmysel vlastnej existencie ako je zachovanie konkrétnych génov. Dawkins svoju teóriu premietol aj do evolúcie ľudskej kultúry, ktorú majú určovať tzv. mémy, kultúrne bloky, ktoré nesú informáciu o určitých ideách alebo vzorcoch ľudského správania a ktoré sa v spoločnosti rozširujú rôznym podaním (ústne, písomne, atď.) a replikujú sa ich imitáciou.

Gény sú samozrejme kľúčové pre uchovávanie informácie nevyhnutnej pre život, vývoj a rozmnožovanie organizmov, genóm obsahuje program ich ontogenetického vývoja (napr. homeotické gény riadia tvorbu špecifických orgánov (uší, očí, končatín a pod., STARR et al. 2013). Avšak na aktivitu a vyjadrenie génov vo fenotype vplývajú aj **epigenetické mechanizmy,** ktoré ovplyvňujú „*vypínanie, zapínanie a výkon*" jednotlivých génov na základe histórie organizmu, zväčša však na báze stavu jeho prostredia (ROSE 1998). Takto spôsobené zmeny v morfológii, fyziológii alebo správaní organizmu teda nie sú spôsobené zmenami DNA a napriek tomu sa môžu dediť (PORTELA & ESTELLER 2010). **Fenotypová plasticita** je v prírode

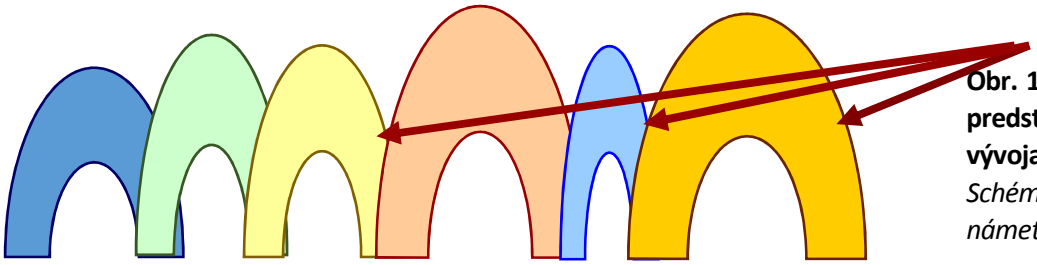
široko rozšírená (dôležitá je najmä pre imobilné organizmy ako sú rastliny), pre konkrétnu populáciu zvyšuje šance jej prežívania v novom prostredí a teda aj pravdepodobnosť jej dlhodobého pretrvávania – a práve táto plasticita môže stimulovať evolúciu v úplne nových smeroch (PRICE et al. 2003).

Jednotkou prírodného výberu v rámci evolučnej teórie je fenotyp, ktorý interaguje s prostredím a až preferencia určitého fenotypu vedie k výberu jemu zodpovedajúcemu genotypu. Dawkinsov kritik Steven Peter ROSE (*1938) upozorňuje, že vzťah medzi génmi a fenotypom druhu výrazne závisí aj od počiatočných podmienok životnej dráhy organizmu. **Ekologická nika druhu v ekosystéme** (rola druhu zahŕňajúca všetky abiotické a biotické podmienky prostredia, ktoré daný druh potrebuje k svojmu prežitiu, rastu a rozmnožovaniu – MILLER 2005; CAIN et al. 2014) **je tvarovaná interakciami s ďalšími druhmi a s jeho prostredím**, a tieto interakcie sú zdrojom zložitosti organizmu aj ekosystému**.** Svoju úlohu hrá aj história vývoja a kontext: napr. bunky v rastlinnom pletive či živočíšnom tkanive sa špecializujú podľa genetickej informácie v závislosti od ich pozície v organizme a od štádia jeho vývoja.

Bod obratu

Zdá sa, že je načase posunúť sa a rozšíriť existujúcu karteziánsko-newtonovskú paradigmu vedy tak, aby sme dokázali nielen analyzovať jej komponenty, ale porozumieť aj zložitým živým celkom. Obraz drancovanej prírody potrebujeme nahradiť pohľadom súnáležitosti prírody a človeka. Na túto tému existuje rozsiahla literatúra. Napr. podľa Capru (1984) euroamerická civilizácia už prekročila svoj kulminačný bod a nachádza sa v pásme kultúrneho zostupu. Na pomenovanie tejto civilizačnej krízy využil pojem **bod obratu,** ktorý vyjadruje hrozby a súčasne aj príležitosti doby (kríza je vždy aj príležitosťou k zmene smerovania). Vychádza pritom z modelu kultúrnej dynamiky vzostupu a pádu civilizácií Stredomoria (obr. 1.10), ktoré podrobne opísal jeden z ich najväčších znalcov Arnold Toynbee (1889 – 1975):

„Potom, čo civilizácie dosiahnu vrchol vitality, strácajú svoju kultúrnu silu a smerujú k úpadku. Podstatným prvkom takéhoto kultúrneho kolapsu býva podľa Toynbeeho strata flexibility. Akonáhle sociálne štruktúry a vzorce správania ustrnú natoľko, že sa spoločnosť už nedokáže prispôsobovať meniacim sa situáciám, nie je ďalej schopná pokračovať v tvorivom procese kultúrnej evolúcie. Bude upadať až sa rozpadne. Kým civilizácia v rozkvete vystavuje na obdiv nekonečnú rozmanitosť a prispôsobivosť, civilizácie v úpadku sa prejavujú uniformitou a nedostatkom vynaliezavosti.“ (Toynbee in CAPRA 1984).



Obr. 1.10. Zjednodušená predstava bodu obratu vývoja starých civilizácií *Schéma:* © Peter Sabo, *námet podľa:* Capra 1984.

Bod obratu predstavuje posun paradigmy založený na systémovej vízii reality, na vnímaní existencie mnohorakých a početných vzťahov a nelinearity živých systémov. Vesmír viac nie je mechanickým strojom, ale **integrovaným a dynamickým celkom (**Capra 1997). Kým v súčasnej paradigme dominuje redukcionistický prístup, v budúcej sa zvýši dôraz na **systémový a ekologický prístup**, t.j. na interakcie v systéme a fungovanie celku. Kým dnes je v popredí kvantita informácie, v budúcnosti sa zvýši dôraz na jej kvalitu a na spojenie výuky so získavaním autentickej ľudskej skúsenosti pri pozorovaní prírody.

Význam ekológie a systémovej ekológie

Prienik redukcionistického a celostného prístupu reprezentujú aj ekologické a environmentálne vedy, študujúce interakcie organizmov navzájom a s ich prostredím, aj toky hmoty, energie a informácie (k novým nástrojom patria napr. GISy aj diaľkový prieskum Zeme). Rastie počet interdisciplinárnych štúdií, ktoré reflektujú synergiu vplyvu mnohých faktorov na biologické, ekologické a sociálne procesy. Systémový prístup takto podčiarkuje úlohu ekológie a systémovej ekológie ako integrálnych vied.

Pojem ekológia sa stal známejším v 60. rokoch minulého storočia, v súvislosti s nástupom environmentálneho hnutia, pričom bol zmätočne používaný aj na označenie tohto hnutia. V tomto prípade je však správne označenie **environmentálny aktivizmus** a environmentálni aktivisti. Je síce pravda, že mnoho ekológov sa angažuje za ochranu prírody a životného prostredia, avšak neplatí to všeobecne, mnohí sú aktívni iba vo vede. Na rozdiel od ekológie **environmentálna veda** predstavuje multidisciplinárnu oblasť, ktorá zahŕňa tak prírodné, ako aj ekonomické a sociálne vedy.

Systémová ekológia je veda o štruktúre, procesoch, funkciách a správaní zložitých ekologických systémov a o hľadaní spoločných, jednotiacich princípov ich organizácie (JØRGENSEN 2012). Kladie dôraz na **štúdium a aplikáciu systémových princípov**, ktoré pôsobia analogicky na rôznych úrovniach organizácie systému. Systémový prístup prináša nové vhľady do fungovania organizmov a ekosystémov, umožňuje modelovať ich štruktúru a správanie, komplexne hodnotiť a prognózovať vplyvy rôznych narušení (tzv. komplexná kauzalita) a prispievať k nachádzaniu efektívnejších riešení.

Integrujúci význam ekológie a systémovej ekológie plasticky vystupuje najmä pri riešení závažných globálnych environmentálnych problémov, napr. význam uhlíkového cyklu vo vzťahu ku zmene klímy, význam trofických vzťahov v ekosytémoch pri riešení problémov úbytku biodiverzity a pod. Práve štúdium a poznanie ekologických pravidiel nám môže pomôcť riešiť mnohé súčasné environmentálne aj sociálne problémy. Problematiku ekológie, systémového prístupu, systémovej ekológie a možnosti jej aplikácie napr. pri štúdiu Zemského ekologického systému podrobnejšie rozoberáme v kapitole 2.

Zhrnutie kapitoly 1

Príroda, sféry Zeme, ekosystém, krajina a ekológia

1) Pojem príroda sa používa najmä na označovanie **prírodných zložiek prostredia** – reliéfu, hornín, pôdy, vody, ovzdušia, rastlín, húb, živočíchov, spoločenstiev a ekosystémov. Pojem **neživá, anorganická príroda** označuje všetku neživú hmotu a energiu vesmíru. Na Zemi zahŕňa horniny a minerály, pôdu, vodu a ovzdušie, geotermálnu energiu, slnečnú energiu a aj energiu vyvolanú gravitačným pôsobením Mesiaca a Slnka. Pojem **živá príroda** označuje živé organizmy a ich ekologické komplexy rôznej zložitosti a úrovne hierarchie: populácií, spoločenstiev, ekosystémov, krajín, atď.
2) Časti prírody (energie, látky a informácie), ktoré ľudská populácia využíva alebo môže využiť na uspokojenie svojich potrieb a záujmov nazývame **prírodné zdroje. Zo systémového pohľadu** však prírodné zdroje nemajú slúžiť výhradne človeku, ale „v ekologicky zdravom" ekosystéme musia byť v rôznej miere k dispozícii všetkým živým organizmom, pretože inak ekosystém nemôže fungovať.
3) **Životné prostredie** vytvára prirodzené podmienky pre existenciu živých organizmov. Jeho základnými abiotickými zložkami sú horniny a pôda, ovzdušie a klíma, voda a reliéf a k biotickým zložkám patria rastliny, živočíchy, huby a mikroorganizmy. **Sférou s vhodnými podmienkami pre život je biosféra**, ktorá zahŕňa všetky živé organizmy Zeme**.** Tento pojem ako prvý použil rakúsky geológ Eduard Suess v roku 1875 a znamená priestor Zeme, časti litosféry, hydrosféry a atmosféry, v ktorom existoval, existuje alebo môže existovať život – spolu so živými organizmami, ktoré ho obývajú.
4) Pojem **ekosystém** predstavuje vysoko organizovanú, od prísunu energie závisiacu, dynamickú a vyvíjajúcu sa funkčnú entitu prírody. Jej živé prvky tvoria rastliny, huby, živočíchy a mikroorganizmy, ktoré interagujú vzájomne a s ich abiotickým prostredím, s ktorým vytvárajú integrovaný funkčný celok. Ekosystém charakterizujú jeho hranice a fyzická štruktúra, interakcie živých organizmov navzájom a ich interakcie s ich abiotickým prostredím, ako aj určitá dynamika vývoja a narušení.
5) **Krajina** je heterogénna časť zemského povrchu vymedzená podľa určitého kritéria (napr. povodie); komplex ekosystémov tvorených vzájomnou interakciou hornín, reliéfu, pôdy, vody, ovzdušia, rastlín, živočíchov a človeka. Pojem **prírodná krajina** označuje krajinu, ktorá vznikla prírodnými procesmi, so žiadnym alebo iba s minimálnymi vplyvmi človeka, nazývaná aj **divočina**. Krajina zmenená človekom je **kultúrna krajina**, má rôzne podoby – urbánna, poľnohospodárska, lesná, rekreačná a i.

6) Pojem **ekológia** definoval nemecký biológ E. Haeckel ako vedu o vzťahoch medzi organizmami a ich prostredím a medzi organizmami navzájom. Systémovejšia definícia od Eugena Oduma hovorí, že **ekológia je veda o štruktúre a funkciách prírody**, pričom štruktúra zahŕňa aj vplyvy abiotických a biotických zložiek na rozšírenie a hojnosť organizmov a funkcie zahŕňajú všetky aspekty ich rastu, vývoja, aj vnútrodruhových a medzidruhových interakcií. **Environmentalistika** je interdisciplinárna veda, ktorá sa zaoberá životným prostredím, vplyvmi človeka a hľadaním riešení environmentálnych problémov.

Globálna environmentálna kríza a význam zložitosti

7) Po prevažnú časť svojej histórie na Zemi človek pretváral jej povrch zväčša iba v miestnom až regionálnom meradle, limitovali ho primitívne technológie, malá veľkosť populácie a nízka spotreba. Napriek tomu sa už **lovcom-zberačom** pripisuje podiel na vyhynutí až 90 rodov vtedajšej megafauny. Väčšiu energiu k pretváraniu prostredia človeku poskytla **poľnohospodárska revolúcia**. Odlesňovanie za účelom získania poľnohospodárskej pôdy a zavlažovanie už pred asi 5 000 – 8 000 rokmi viedli k malému zvýšeniu koncentrácie skleníkových plynov CO_2 a CH_4 v atmosfére.

8) Radikálnou zmenou bola až **priemyselná revolúcia**. Využívanie fosílnych palív viedlo k masovej výrobe už v 18. storočí a v druhej polovici 20. storočia k zelenej revolúcii v poľnohospodárstve, ktorá s pomocou minerálnych hnojív a pesticídov zabezpečila podstatné zvýšenie produkcie potravín. Globálne zmeny sa prudko zrýchlili od roku 1950 (veľké zrýchlenie), pričom exponenciálne zrýchlenie socio-ekonomického rozvoja sa premieta do degradácie Zemského ekologického systému.

9) Súčasné vplyvy človeka na životné prostredie sú veľmi rozsiahle, rozmanité a intenzívne. Zahŕňajú **degradáciu všetkých zložiek životného prostredia** – úbytok biodiverzity, stratu alebo inú degradáciu úrodnej pôdy, vyčerpávanie vodných zdrojov, rozsiahle znečisťovanie vody aj ovzdušia. S tým súvisí aj zmena klímy, stenčenie stratosférickej ozónovej vrstvy, acidifikácia oceánov a iné.

10) K medzníkom, ktoré podnietili nástup environmentálneho hnutia patria práce biologičky **Rachel Carsonovej.** V románe ***"Tichá jar***" (1962) prvý raz upozornila na vysoké riziká masového používania pesticídov a iných syntetických chemikálií. V roku 1972 Meadowsov tím publikoval **Limity rastu**, výsledky modelovania piatich globálnych trendov: rastu ľudskej populácie, zabezpečenia výživy, priemyselného rozvoja, využívania prírodných zdrojov a znečistenia, s prognózou rizika globálneho kolapsu.

11) V r. 1987 Svetová komisia pre životné prostredie a rozvoj pod vedením Gro Harlem Brundtlandovej predložila správu „Naša spoločná budúcnosť“, ktorá ako alternatívu globálneho vývoja navrhla **koncepciu udržateľného rozvoja**. V roku 1992 túto koncepciu schválila Konferencia OSN o životnom prostredí a rozvoji (UNCED) konaná v Rio de Janeiro. Táto koncepcia sa snaží integrovať environmentálny, ekonomický a sociálny pilier spoločnosti. Viedla k početným zlepšeniam, najmä k rozvoju úsporných technológií, environmentálneho práva, nových stratégií a projektov.

12) Napriek tomu, stále prevažuje **rozvoj dlhodobo neudržateľný**. Podmieňuje ho vysoká zotrvačnosť dominujúcich socio-ekonomických prístupov a používanie nesprávnych indikátorov, príkladom je tretia zložka indexu ľudského rozvoja, hrubý domáci produkt (HDP). Preto je potrebné vrátiť sa k posolstvu tých štúdií, ktoré upozorňovali, že nekonečný hospodársky rast v konečnom systéme nie je možný.

13) K priamym **hybným silám environmentálnej krízy** patrí najmä zmena využívania krajiny a s ňou spojená likvidácia a fragmentácia ekosystémov, znečisťovanie prostredia, nadmerné využívanie ekosystémov, nástup inváznych druhov a nových patogénov a súčasná zmena klímy. Nepriame hybné sily krízy môžeme rozčleniť na fyzické (napr. rast ľudskej populácie), sily spojené s platnou vedeckou paradigmou (napr. podceňovanie ekologickej zložitosti) a vnútorné ľudské resp. hodnotové sily (napr. rast konzumu, nedostatočná etika vo vzťahu k prírode a pod.).

14) Problémom súčasnej paradigmy je aj **nedostatočná reflexia vysokej biologickej, ekologickej aj sociálnej zložitosti** nášho sveta. Táto zložitosť spôsobuje, že správanie týchto systémov je nelineárne, čo sťažuje prognózovanie ich vývoja. A zvyšuje riziko náhlych, aj katastrofických zmien systému. Výskum **princípov organizácie a fungovania zložitých živých systémov** je dôležitý pre ich udržateľný manažment, otvorený novým informáciám a rešpektujúci spätné väzby.

Veda a potreba posunu paradigmy, význam ekológie

15) Veda predstavuje matematicko-empirické skúmanie fyzickej skutočnosti, ktoré súčasťou je systematické získavanie, overovanie a interpretovanie poznatkov o svete. Moderná veda dosiahla úspechy, ktoré zásadne rozšírili naše poznanie a zvýšili materiálnu kvalitu života ľudí. Dnes je kľúčovou autoritou a poskytuje aj nástroje pre riešenie globálnych problémov. Dnes však žijeme v období nevyhnutného **posunu paradigmy vedy** smerom od mechanistického k celostnému, systémovému prístupu.

16) Dedičstvom mechanistického svetonázoru sú niektoré dnes už prekonané idey Galileiho, Bacona a Descartesa. **Galileo Galilei** za dôležité vlastnosti prírodnín považoval iba tie, ktoré sa dajú merať, podcenil význam zmyslového vnímania. **Francis Bacon** prišiel s koncepciou dominancie človeka nad prírodou, ktorá sa stala pilierom drancovania prírodných zdrojov a zotročovania iných národov. **René Descartes** položil hlavný základ mechanistického svetonázoru, podľa ktorého prírode možno plne porozumieť pomocou jednoduchej analógie s fungovaním hodinového stroja.

17) Fritjof Capra prirovnal súčasnú krízu k **bodu obratu** vývoja civilizácie, ktorá už prekročila svoj kulminačný bod. Bod obratu však vyjadruje **nielen riziká, ale aj nové príležitosti doby.** Je výzvou porozumieť svetu v širšom kontexte a rozvinúť systémový prístup k štúdiu zložitých systémov. Prienik analytického (redukcionistického) a celostného, systémového prístupu predstavujú práve ekologické vedy.

18) Prvý pojem ekológia definoval nemecký biológ Ernst Haeckel (1834 – 1919) v roku 1869 ako **vedu o vzťahoch medzi organizmami a ich prostredím a medzi organizmami navzájom.** Mnoho iných definícií ako predmet hlavného štúdia ekológie zdôrazňuje práve vzťahy medzi organizmami a medzi organizmami a ich prostredím, vrátane adaptácií organizmov k ich prostrediu, otázky priestorového a časového rozšírenia organizmov, princípy ich zoskupovania do spoločenstiev a pod.

19) **Systémová ekológia je veda o štruktúre, procesoch, funkciách a správaní zložitých ekologických systémov** a o hľadaní spoločných princípov ich organizácie. Kladie dôraz na štúdium systémových princípov na rôznych úrovniach organizácie živých systémov. Tým prináša nové vhľady do fungovania organizmov, populácií, spoločenstiev a ekosystémov, umožňuje modelovať ich štruktúru a správanie, komplexne hodnotiť a prognózovať vplyvy ich antropogénnych aj prírodných narušení. Týmto spôsobom táto relatívne mladá veda súčasne prispieva k hľadaniu efektívnych riešení.

Kontrolné otázky

1) Charakterizujte postupný nárast vplyvov človeka na prírodu a krajinu v predindustriálnom období.
2) Charakterizujte obdobie od priemyselnej revolúcie k veľkému zrýchleniu.
3) Prečo súčasný globálny vývoj môžeme označiť ako rozvoj dlhodobo neudržateľný?
4) Vymenujte nepriame hybné sily environmentálnej deteriorizácie, ktoré považujete za kritické?
5) Akú úlohu hrá v našom reagovaní na krízu nedostatočné vnímanie ekologickej zložitosti?
6) V čom spočíva vedecký prístup k poznávaniu sveta? Aký je prínos modernej vedy?
7) V čom je oprávnená kritika zakladateľov modernej vedy, ako boli napr. Bacon a Descartes?
8) Čo je to paradigma? V čom spočíva problém mechanistickej paradigmy?
9) Vysvetlite koncepciu bodu obratu.
10) V čom spočíva význam ekológie a systémovej ekológie?

Námety na kritické zamyslenie

1) Aké typy degradácie biotopov a ohrozenia druhov poznáte v okolí svojho bydliska?
2) Aké vidíte možnosti zastaviť / zmierniť ďalší nárast hybných síl environmentálnej krízy?
3) Na aké kľúčové otázky by podľa Vás mal odpovedať začínajúci posun paradigmy?
4) Prečo považujeme redukcionistický a celostný prístup vo vede za komplementárne?

„Sme časťou tejto zeme a ona je časťou nás. Voňavé kvety sú naše sestry; jeleň, kôň, bielohlavý orol sú naši bratia. Skalnaté hrebene, šťavnaté lúky, teplo poníkovho tela i človek – všetci patria do tej istej rodiny. ... Jednu vec vieme. Zem nepatrí človeku; človek patrí zemi. Vieme aj to, že všetky veci sú spojené tak, ako krv spája jednu rodinu. Všetky veci sú spojené. Čokoľvek postihne zem, postihne aj synov zeme. Človek nespriada pradivo života, on je len jedným vláknom v ňom.“

Z reči náčelníka Dwanišov Seattla, ktorá údajne zaznela na severozápade USA v roku 1854 (SEED et al. 1993)

2 Teória systémov, zložitosť života a narušenie Zemského systému

V úvode týchto textov sa snažíme načrtnúť širší kontext významu a zmyslu štúdia systémovej ekológie. Tento kontext vytvárajú najmä kritické globálne problémy, ktoré sú prejavom prekročenia ekologických limitov život udržujúcich systémov. Pokúšame sa tiež priblížiť dôvody, prečo je v súvislosti s globálnymi výzvami dôležité reflektovať aj vysokú zložitosť (komplexitu) biologických a ekologických systémov. V tejto kapitole preto sumarizujeme aj niektoré základné pojmy z oblasti systémovej teórie, ekologickej komplexity a systémovej ekológie, ktoré budú podrobnejšie rozobrané neskôr.

Náhla premena Sahary zo savany na púšť

Komponenty Zemského ekologického systému – najmä litosféra, hydrosféra, atmosféra, biosféra a noosféra sú poprepájané početnými interakciami. Zmena v jednom komponente mení aj tie ďalšie.

Príkladom fungovania tohto systému je aj dynamika Sahary. Dnešná rozľahlá púšť bola pred 9 000 rokmi zeleným regiónom, s lesmi, savanami, mokraďami a jazerami. Vedci to zistili základe paleobotanického výskumu morských a jazerných sedimentov, podľa ktorého bola Sahara zelená aj v obdobiach pred 50 000 – 45 000 rokmi a pred 110 000 – 120 000 rokmi, v tých, ktoré korešpondujú s rozsiahlou migráciou ľudí z Afriky do Európy.

Západný okraj púšte Sahara v Maroku.
Foto: © Martin Sabo, 2019.

Posledná, relatívne náhla premena na púšť začala asi pred 5 600 rokmi (podľa iných zdrojov pred 6 700 rokmi), pričom hlavná zmena sa udiala iba počas niekoľkých storočí, pred 4 000 – 3 600 rokmi. Za hlavný spúšťač tejto zmeny sa považujú zmeny orbitálnej dráhy Zeme a sklon jej osi. Pred 9 000 rokmi bol tento sklon málo väčší ako dnes (24,14 ° oproti súčasným 23,45 °) a Zem dosahovala perihélium (bod na obežnej dráhe kedy je Zem najbližšie Slnku) v letnom období, kým dnes ho dosahuje v januári. To znamená, že v letnom období severná pologuľa prijímala oveľa viac slnečného žiarenia, čo posilňovalo západoafrický monzún. Ten prinášal na Saharu bohaté zrážky, ktoré podmienili bohatú vegetáciu a život v riekach a jazerách. Postupná zmena orbitálnej dráhy a sklonu Zeme spôsobila, že tento monzún zoslabol.

S nižšími zrážkami začala aj aridizácia Sahary, najprv ustúpili lesy a na ich miesto nastúpila savana a polopúštne kroviny. Avšak orbitálna dráha aj sklon Zemskej osi sa menia pomaly a kontinuálne, preto to nestačí na vysvetlenie rýchlej premeny Sahary na púšť v priebehu iba niekoľkých storočí. Doterajší výskum hľadá vysvetlenia aj v spätných väzbách medzi klimatickým systémom a vegetáciou resp. medzi klimatickým systémom a oceánskymi prúdmi západne od Afriky. Archeológovia tiež poukazujú na možný vplyv človeka (napr. devastáciu vegetácie nadmernou pastvou kôz). Keďže svet čelí globálnej zmene klímy, tento príklad upozorňuje na zložité prepojenia v Zemskom systéme a na riziko jeho náhlej zmeny.

Upravené podľa: CLAUSSEN et al. 1999; STEFFEN et al. 2004; LIU et al. 2006, PEREIRA 2008, CASTAÑEDA et al. 2009

2.1 Od teórie systémov k biologickej a ekologickej zložitosti

Približne do polovice 20. storočia dominovali vo vede redukcionistické prístupy, ktoré vychádzali najmä z Galileovho zamerania sa na meranie a kvantifikáciu objektov a javov a z Descartovej analytickej metódy rozloženia otázok o vedeckom probléme na čo najviac častí (DESCARTES 1992). V praxi to znamená **dekompozíciu zložitého celku na jednoduchšie komponenty**, ich oddelené skúmanie a zlučovanie takto získaných poznatkov, čo korešponduje s Descartesovou redukciou prírodných objektov na zložité mechanické stroje (CLARKE 1993). Treba uviesť, že táto metóda má svoje významné prínosy, najmä v kontexte zložitosti sveta a špecializácie modernej vedy. Nedostatkom však je, že pri takomto výskume sa zanedbávajú vzťahy medzi jednotlivými komponentami a tieto vzťahy sú kľúčové pre porozumenie štruktúre a správania sa celku.

Posun dôrazu vedeckého výskumu od prvkov k sieťam interakcií, ktoré spolu s prvkami vytvárajú vyšší funkčný celok, a tým aj od entít k procesom v 20. storočí priviedol k pojmu systému. Tento termín pre označenie organizmov, ale aj sociálnych systémov použil ako prvý biochemik a filozof **Lawrence Jospeh Henderson** (1878 – 1942, CAPRA 1997). Systémový prístup kladie dôraz na výskum celku systému, ako aj vzťahov medzi jeho prvkami. Aj v biológii a ekológii je dnes základom štúdia štruktúry a správania sa živých systémov.

2.1.1 Vybrané z teórie systémov

Správanie systémov skúma tzv. **všeobecná teória systémov** publikovaná v roku 1968 **Ludwigom von Bertalanffym** (1901 – 1972), rakúskym biológom, hľadajúcim univerzálnu teóriu, ktorá by umožnila aplikovať na systémy rôznej povahy (napr. biologický, technický, sociálny, ekonomický) spoločné princípy a zákonitosti ich organizácie (BERTALANFFY 1968, 1972). Pojem systém označuje *„komplexy a prvky v interakcii, na ktoré možno aplikovať zákonitosti systému".* Teória systémov predpokladá, že **správanie všetkých entít v systéme je podobné a riadené rovnakými princípmi a zákonitosťami**, bez ohľadu na to, o aký konkrétny fyzický systém a aké interakcie medzi jeho prvkami sa jedná (ADAMS et al. 2013). Cestu k tejto teórii Bertalanffymu už od 20. rokov 20. storočia dláždili najmä jeho vlastné práce v oblasti teoretickej biológie a práce a experimenty ďalšieho významného biológa tej doby Paula Weissa (DRACK et al. 2007).

Otázkam univerzálnej organizácie systémov sa ešte pred nimi, na začiatku 20. storočia, venoval ruský lekár a filozof Alexander Alexandrovič Bogdanov (1873 – 1928), ktorý technické, prírodné a spoločenské systémy označoval ako komplexy, s cieľom nájsť, zovšeobecniť a systematizovať princípy organizácie týchto komplexov a trendy ich vývoja. Jeho teória organizácie štruktúr, nazvaná **tektológia,** však bola za hranicami Ruska neznáma a v samotnom Rusku desaťročia zakázaná, jej prínos je výraznejšie oceňovaný až v posledných rokoch (CAPRA 1997; BELOKOPYTOV 2013). (Neskorší vývoj a prínos autorov, ktorí teóriu systémov aplikovali v oblasti živých aj sociálnych systémov alebo rozvíjali jej matematické, kybernetické a filozofické aspekty približujú napr. ADAMS et al. (2013), LAI & LIN (2017) a iní.)

Nižšie stručne sumarizujeme základné charakteristiky fyzikálnej štruktúry a dynamiky systému, pričom vychádzame tiež z prác Capru, ktorý ďalej rozvíjal teóriu systémov (CAPRA 1984, 1997) a z prác bratov Odumovcov, ktorí túto teóriu premietli do ekológie (ODUM 1977; ODUM & ODUM 2003).

Koncepcia fyzickej štruktúry systému – hranice, prvky, väzby a okolie

Systém (z gréckeho *„synhistanai"* – dať spolu*)* **tvoria fyzické prvky systému a vzťahy medzi nimi navzájom a ich vzťahy s prostredím,** ktoré tieto prvky prepájajú a systém organizačne vyčleňujú z jeho okolia, vonkajšieho prostredia systému. Každý systém charakterizujú fyzické hranice, ktoré určujú jeho priestorový rozsah, povrch aj fyziognómiu, ďalej sú to základné entity – prvky (konštituenty) systému, ich interakcie a procesy, interakcie s prostredím, toky látok, energie a informácie do systému (vstupy), v systéme a von zo systému (výstupy), vlastnosti a dynamika celku, jeho správania sa. Napr. v ekosystéme sú jeho prvkami druhy, ale tiež neživé entity ako geologický podklad, reliéf, slnečné žiarenie, klíma, voda a pôda. Všetky tieto prvky sú vo vzájomných interakciách

Fyzické, priestorové hranice systému sú rôzne pevné, v prípade živých systémov sú polopriepustné (semipermeabilné) – systém oddeľujú od jeho **okolia,** ale súčasne ho s ním do určitej miery aj prepájajú. Napr. cytoplazmatická membrána oddeľuje bunku od jej okolia, a súčasne funguje ako špecifická organela, ktorá umožňuje výmenu látok s okolím. Analogicky funguje aj ekotón, rozhranie susedných ekosystémov, ktorý umožňuje toky látok, energie a génov medzi susediacimi ekosystémami. **Permeabilita hraníc** živého systému umožňuje aby cez ne prechádzali toky hmoty, energie a informácií, ktoré daný systém potrebuje k vytváraniu a udržiavaniu svojho vnútorného usporiadania (FATH 2014).

Prvok systému je základná identifikovateľná entita, z pohľadu zvolenej hierarchickej úrovne už ďalej nedeliteľná – napr. organela v bunke, bunka v tkanive, tkanivo v orgáne, populácia druhu v ekosystéme, topický (miestny) ekosystém v krajine, atď. Fyzické rozmiestnenie prvkov vnútri hraníc systému, ich druhy, počty a vzájomné vzťahy vytvárajú určitú **fyzickú štruktúru systému** a ich interakcie zabezpečujú toky látok, energie a informácií, voči ktorým musí byť fungujúci systém otvorený. Životnosť jednotlivých prvkov biologického, ekologického alebo sociálneho systému býva spravidla oveľa kratšia ako životnosť celku (napr. bunky v organizme, organizmu v ekosystéme, človeka v civilizácii) – tieto prvky sa v priebehu životného cyklu systému mnohokrát reprodukujú a obmieňajú, napr. v dospelom ľudskom organizme každú minútu umierajú a regenerujú sa desiatky miliónov buniek (STARR et al. 2013).

Fyzická štruktúra definuje rámec pre vzájomné interakcie prvkov systému. Tieto **interakcie** spočívajú v tom, že zmena stavu jedného prvku spôsobuje zmenu stavu iného prvku. Jeden prvok teda ovplyvňuje druhý prvok, s ktorým je v interakcii. Zreťazením interakcií v čase a priestore sa vytvárajú **procesy** ako usporiadané kauzálne postupnosti udalostí. Napr. proces fotosyntézy môžeme zjednodušene opísať ako zreťazenie týchto interakcií: zachytenie fotónu slnečnej energie molekulou chlorofylu, transformácia zachytenej energie na dočasné formy chemickej energie a následná transformácia týchto foriem energie do energeticky stabilnejších cukrov (v skutočnosti ide o zložitý proces, STARR et al. 2013).

Nesmieme zabudnúť ani na **okolie systému** – vonkajšie objekty, procesy a parametre, ktoré prostredníctvom interakcií cez hranice systému ovplyvňujú prvky systému a tým aj jeho štruktúru a vlastnosti. Vplyv vonkajšieho prostredia vo vzájomnej interakcii fakticky neustále systém modeluje takým smerom, aby sa kompozícia prvkov, štruktúra systému a na nej realizované procesy vyrovnali s meniacimi sa vonkajšími podmienkami. Analogicky aj systém pôsobí na svoje vonkajšie prostredie. Stav systému označuje súbor jeho aktuálnych vlastností, vyjadrených hodnotami jeho premenných.

Formálne matematické vyjadrenie zložitého systému

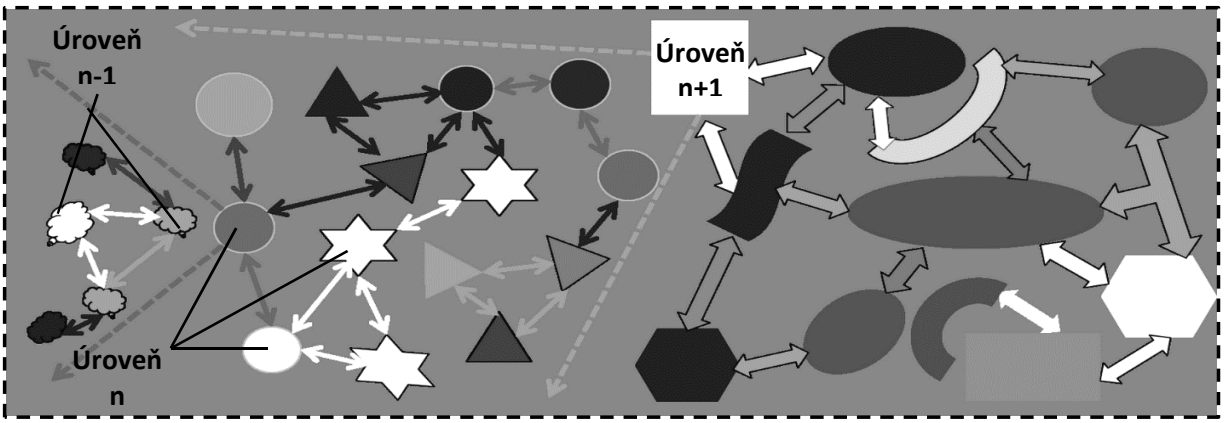
Formálny matematický zápis systému môžeme vyjadriť napríklad v tvare SG = (Q, I, O, Y, δ, λ, q_0), kde Q, I a O sú množiny stavov, vstupov a výstupov systému, δ je zobrazenie Q x I do Q (prechodové), λ je zobrazenie Q x I do O a q_0 je počiatočný stav systému. Vzhľadom k zložitosti systémov je dôležitý aj slovný opis.

Iný jednoduchý formálny zápis, tentoraz obmedzený na fyzickú štruktúru systému, má tvar S = {**c**, **r**}, kde vektor **c** = $\{c_1,c_2,...,c_j\}$ označuje počty rôznych prvkov systému (*constituents, elements*, j je počet prvkov a vektor **r** = $\{r_1,r_2,...,r_k\}$ označuje vzťahy medzi prvkami systému (*relations*), kde k je počet rôznych vzťahov.

Okrem vektorov **c** a **a** sú k opisu systému spravidla potrebné aj ďalšie vektory, ktoré vyjadrujú vnútorné obmedzenia interakcií **l** (*limits, restrictions*), vlastnosti systému **p** (*properties* – kumulatívne aj emergentné), hranice systému **b** (*boundaries* – najmä objem, povrch a tvar), vplyvy okolia, vstupy do systému **e** (*environment* – jeho charakter určuje typy tokov energie, hmoty a informácie, ich rozsah a intenzitu) a napokon cezhraničné vplyvy systému, t.j. výstupy systému **o** (napr. v prípade ekosystému emitovanie dlhovlnného žiarenia, export kyslíka, oxidu uhličitého a vody, únik živín, emigrácia organizmov).

Hodnoty uvedených veličín v danom časovom bode charakterizujú stav systému a tieto hodnoty sa v čase menia. Správanie systému charakterizujú načrtnuté zobrazenia, postupnosti a cykly jeho rôznych stavov, vytvárajúce pre systém typické trajektórie, v prípade zložitejších systémov sú na ich kvantitatívny opis potrebné ďalšie vhodné matematické nástroje, ako sú napr. grafy, matice, diferenciálne rovnice a pod.

Upravené podľa: BRUNOVSKÝ & ČERNÝ 1980; MIKLÓS 1998; GYFTOPOULOS & BERETTA 2005



Obr. 2.1. Schematický model vnárania systémov z pohľadu troch úrovní hierarchie. Prerušované **čiary načrtávajú hranice jednotlivých hierarchicky usporiadaných systémov.** Napr. ak pod úrovňou „n" rozumieme jednotlivé synúzie, t.j. spoločenstvá v užšom zmysle (lišajníkov, machorastov, cievnatých rastlín, mäkkýšov, hmyzu, vtákov,...), potom hierarchicky nižšou úrovňou „n-1" pre každé z nich budú jednotlivé populácie, ktoré ho vytvárajú. Hierarchicky vyššou úrovňou bude v tomto prípade ekosystém (napr. les, lúka, pole, jazerá a rieky, ale aj sídla, parky a pod.) *Schéma:* © Peter Sabo, 2020.

Systém ako integrovaný dynamický celok

Interakcie prepájajú a integrujú prvky systému do zložitých sietí, poznáme napr. potravné siete, ekologické siete v krajine, ale aj sociálne siete. **Siete** prepájajú a integrujú prvky systému do dynamického a funkčného celku. Napr. vertikálne trofické ekologické siete (potravné pyramídy) zabezpečujú transformáciu energie na jednotlivých trofických úrovniach a toky hmoty a energie. Zokruhovanie postupností interakcií vytvára **cykly** a ich pravidelné opakovanie **rytmy** striedania udalostí (napr. srdcový rytmus, dýchanie, cirkadiálny rytmus, striedanie ročných období).

Ak efekt na výstupe kauzálne spojených a do cyklu zokruhovaných prvkov systému spätne ovplyvňuje počiatočný prvok tejto slučky, hovoríme o **spätnej väzbe** (podrobnejšie sa jej venujeme v kapitole 5). Táto môže vstup do systému buď zosilňovať (kladná spätná väzba, umožňujúca napr. rast organizmov aj populácií) alebo zoslabovať (záporná spätná väzba, ktorá pomáha udržiavať vnútornú rovnováhu systému – homeostázu). So sieťovou organizáciou systému súvisia aj vnútorné obmedzenia (limity), ktoré určujú medzi ktorými prvkami a za akých podmienok sa určité interakcie môžu realizovať (napr. aké potenciálne medzidruhové interakcie môžu v ekosystéme prebiehať a aké sú vylúčené).

Priestorový rozsah a trvanie procesov a cyklov sú veľmi rozdielne. Dlhodobým procesom v rámci geologických dôb bolo napr. znižovanie koncentrácie uhlíka v zemskej atmosfére jeho viazaním v morských sedimentoch a v budúcich fosílnych palivách, čo znížilo skleníkový efekt a tým zmiernilo vplyv postupného zvyšovania slnečnej radiácie (LOVELOCK 1991). Strednodobé kolísanie CO_2 v atmosfére (a teploty zemského povrchu) zas súvisí s cyklami striedania glaciálov a interglaciálov v štvrtohorách, kým ročné zmeny koncentrácie CO_2 v atmosfére súvisia s rotáciou Zeme a s jej obehom okolo Slnka. Podstatne krátkodobejšie sú zmeny koncentrácie CO_2 vnútri chloroplastov v priebehu fotosyntézy.

Interakcie, procesy, cykly a spätné väzby sú tmelom, ktorý drží pohromade fyzickú štruktúru systému, vytvára jeho vnútornú organizáciu (časopriestorové usporiadanie prvkov a väzieb), t.j. **integruje jeho prvky do dynamického a funkčného celku.** V tomto kontexte je dôležité „*riadenie*" resp. „*obmedzenie*" voľnosti jednotlivých prvkov vyšším celkom v záujme udržania jeho funkčnosti. Bertalanffy v tejto súvislosti stanovil niekoľko **princípov, ktoré sú dôležité pre biologickú organizáciu** (od úrovne buniek až po biocenózy, DRACK et al. 2007). Prvým je otvorenosť živého systému voči tokom hmoty a energie, dnes už vieme, že je to otvorenosť aj voči tokom informácie. Druhým je progresívna organizácia, ktorá spočíva vo vytváraní hierarchií, v diferenciácii a špecializácii (napr. buniek v pletive a tkanive, orgánov v organizme, druhov v ekosystéme) a tretím je primárna aktivita organizmu, ktorý nie je iba pasívnym objektom adaptujúcim sa na prostredie, ale je schopný „*vytvárať sa ako celok*" (DRACK et al. 2007).

Stav systému sa definuje na báze množiny merateľných stavových premenných a ich zmeny sa popisujú diferenciálnymi rovnicami. BERTALANFFY (1972) z týchto rovníc odvodzoval aj matematické vyjadrenie významných vlastností systému, ako napr. celostnosť, stabilitu systému a ďalšie aspekty jeho správania sa. Z významu interakcií vyplýva, že k podstatným charakteristikám zložitej organizácie systému patrí aj vzájomná prepojenosť jeho prvkov, t.j. ich **konektivita** v rámci rôznych typov sietí.

Pre charakterizovanie systému potrebujeme tiež poznať jeho vlastnosti, ktoré sú výsledkom pôsobenia dvoch charakteristík: hierarchickej štruktúry systému a spojení, interakcií medzi jeho prvkami, ktoré vytvárajú zložité siete (TREWAVAS 2006). **Hierarchická organizácia systémov** znamená, že systémy hierarchicky nižších úrovní sa vnárajú, integrujú do systémov vyšších hierarchických úrovní (napr. bunky sa integrujú do pletív a tkanív, miestne populácie druhov sa integrujú do spoločenstiev, obr. 2.1). Celok systému nevyhnutne organizuje a obmedzuje správanie jeho jednotlivých komponentov (TREWAVAS 2006).

Načrtnutá organizácia systému zabezpečuje jeho funkčnosť ako celku a jeho interakcie sú zdrojom jeho **kumulatívnych vlastností** (ktoré možno získať kumuláciou vlastností jeho prvkov), ale aj úplne nových a často charakteristických čŕt. Tieto nové, tzv. **emergentné vlastnosti** nie sú pozorovateľné na úrovni prvkov systému, ale v dôsledku ich interakcií sa „vynárajú“ až na organizačnej úrovni celku.

Okrem už načrtnutých princípov sú kľúčovými mechanizmami vzniku, vývoja, pretrvávania a dynamiky systémov v čase predovšetkým autoorganizácia a autoregulácia a ďalšie z nich odvodené mechanizmy, napr. autopoiéza, homeodynamika a iné. (Týmto mechanizmom a organizačným princípom živých systémov, ktoré vychádzajú z teórie systémov, sa podrobnejšie venujeme v kapitole 5.)

Systémový prístup

Systémový prístup charakterizuje dôraz na štúdium **štruktúry, procesov a emergentných vlastností celku,** spontánne sa „vynárajúcich“ práve na úrovni celku, preto ich nie je možné odvodiť iba štúdiom vlastností jeho prvkov. Na rozdiel od mechanistickej paradigmy **systémové vnímanie** zahŕňa nielen prvky, ale aj siete ich vzťahov a celistvosť a funkčnosť celku. Práve vzťahy a interakcie totiž definujú emergentné vlastnosti celku a jeho správanie (Capra 1997). Napr. pohľad na prírodné zdroje sa z ich vnímania ako statickej suroviny mení a zahŕňa už aj zložité siete interakcií, ktoré viedli k ich vzniku, resp. prostredníctvom ktorých sa niektoré zdroje obnovujú. V týchto vzťahoch už má svoje miesto aj pozorovateľ – súčasťou každej súčasnej vedeckej práce je aj opis použitej metódy, pretože *„to, čo pozorujeme, nie je príroda sama, ale príroda vystavená našej metóde kladenia otázok*“ (Heisenberg in CAPRA 1997).

K hlavným nástrojom teórie systémov patrí matematika, najmä teórie grafov, sietí a hier, počítačová veda, teória chaosu a kybernetika (z gréc. *„kybernetes“* – kormidelník, WIENER 1965), veda, zameraná na riadenie a komunikáciu v biologických, sociálnych a technických systémoch. **Predmetom výskumu kybernetiky je systém ako celok**, funkčná entita a centrom jej záujmu sú otázky organizácie systémov a k nej potrebné informačné mechanizmy – nemateriálne entity ako sú signály, spätné väzby, riadenie vnútorných procesov v systéme za účelom udržiavania jeho dynamickej rovnováhy (homeostázy).

Matematika a kybernetika sú dnes významnými nástrojmi pre **systémovú analýzu a syntézu**, obe sú potrebné na porozumenie problému a hľadanie riešení. Zhruba od polovice 20. storočia sa tieto vedy a systémové princípy aplikujú už nielen pri štúdiu technických, ale stále viac aj biologických, ekologických, sociálnych a ekonomických systémov. Keďže kľúčom k riadeniu zložitých systémov je rozpoznanie a ovládanie riadiacich informácií, stále sofistikovanejšie počítače sa dnes využívajú nielen pri riadení výrobných technológií, ale v stále väčšej miere aj pri biologickom a ekologickom výskume a pri monitoringu stavu, **vývojových trendov a manažmente ekosystémov,** pri riadení využívania prírodných zdrojov.

Systémový prístup viedol aj k **modelovaniu ekologických systémov**, pri ktorom sa reálny systém nahrádza jeho abstraktnou reprezentáciou. Jej prvky môžu reprezentovať napr. jednotlivé populácie, spoločenstvá alebo miestne ekosystémy, podobne sa reprezentujú aj ich vzťahy. Počítačové modelovanie prírodných aj socioekonomických systémov umožňuje simulovať v krajine prebiehajúce procesy a do určitej miery **prognózovať správanie systémov** (napr. generovanie rôznych scenárov vývoja

zmeny klímy v závislosti od priorít spoločnosti). Tvorba modelov je zväčša silne interdisiciplinárna, v ekológii modely nahrádzajú experimenty, ktoré sú náročné na čas a nie vždy realizovateľné (RUŽIČKA 2002). Pri interpretácii výsledkov však nesmieme zabúdať, že aj ten najlepší model je nutným zjednodušením reality, preto nemôže zachytiť všetky javy a procesy, ktoré sa týkajú skúmaného celku.

CAPRA (1997) považuje za kritériá **systémového prístupu najmä presun dôrazu od častí k celku,** z prvkov na vzťahy a procesy, schopnosť vnímať a mapovať „*konfigurácie usporiadaných vzťahov*“, charakteristických pre určité systémy, nelineárne procesné myslenie a súbežné uvažovanie viacerých hierarchických úrovní pri riešení problému, ako aj vnímanie kontextu väčšieho celku, ktorý umožňuje porozumieť javom v ich súvislostiach, vnímať dynamiku a kontinuitu interakcií v rámci celku (obr. 2.2).

Podľa BERTALANFFYHO (1968) k systémovému mysleniu patrí aj schopnosť **formulovať všeobecné a exaktné systémové princípy** a tvorivo ich aplikovať v rôznych vedných odboroch. Preto aj systémová ekológia prichádza s met ódou skúmania zložitému celku na báze systémovej analýzy a syntézy, pričom dôraz kladie na výskum interakcií a od ekologického celku odvíja porozumenie významu jeho prvkov. To je výrazne iný prístup, než aký používa redukcionistická veda, ktorá vysvetľuje zložité vychádzajúc z jednoduchého. Tu treba povedať, že nie neoprávnene, redukcionistický prístup umožnil rozvoj biológie, mikrobiológie, do veľkej miery aj ekológie a ďalších vied.

Obr. 2.2 Systémový vz. lineárny prístup. V prípade cyklotrasy a pešieho chodníka v Piešťanoch (obr. vľavo, *foto:* © Michael Hüttl, 2018) krajinná architektka zvýraznila väzby medzi komponentami krajiny (cyklotrasa, chodník, dreviny, trávniky a potok Dubové) a vytvorila vyšší sociálno-ekologický systém s dôležitými ekosystémovými službami (ES). V prípade cyklotrasy v Banskej Bystrici (obr. vpravo, *foto*: © P. Sabo, 2020) k systémovému prepojeniu komponentov nedošlo napriek tomu, že brehové porasty Tajovského potoka a zelené plochy medzi cyklotrasou a cestou predstavujú bohatší potenciál ES.

2.1.2 Ilustrácia systémových historických koncepcií v biológii a ekológii

Pri hľadaní ciest ako riešiť súčasné rozsiahle problémy sa však už môžeme oprieť aj o viaceré systémové prístupy, ktoré možno nájsť v histórii vývoja biológie a ekológie (podrobnejšie napr. SMITH 1996).

K prvým prelomovým „celostným objavom“ patria poznatky anglického lekára **Williama Harveyho** (1578 – 1657), ktorý prvý objavil uzavreté prúdenie krvi, vrátane kľúčovej úlohy srdca, čo však v jeho dobe väčšina lekárov spochybňovala. K systematickému triedeniu poznatkov o živej prírode zásadne prispel švédsky lekár a prírodovedec **Carl Linné** (1707 – 1787), ktorý zaviedol prvé taxonomické triedenie rastlín a živočíchov a ním zavedený systém binomickej nomenklatúry sa používa dodnes.

Možno prvým prírodovedcom novoveku, ktorý vnímal jednotu prírody bol škótsky geológ **James Hutton** (1726 – 1797), podľa ktorého zemskú kôru neustále formujú geologické procesy, pričom geologické a biologické procesy sú vzájomne prepojené. Zem vnímal ako živú entitu a preto ju nazval superorganizmom, čím predbehol Lovelockovu hypotézu Gaia o zhruba dve storočia (LOVELOCK 1991).

Prírodovedec, mysliteľ a básnik **Johann Wolfgang Goethe** (1749 – 1832) spájal umenie s vedou a celostný pohľad na prírodu so štúdiom jej detailov. Venoval sa fyziológii rastlín aj porovnávacej anatómii. Za krásou a rozmanitosťou tvarov, farieb, zvukov a vôní hľadal ich podstatu, akési **praprincípy, pratvary aj polarity**, ktoré považoval za základ harmónie v prírode (GOETHE 1982). Jeho vedecký výskum sa prelína s romantickým pohľadom umelca, ktorému nestačili redukcionistické odpovede.

K základom ekológi e (ešte predtým ako pojem definoval v roku 1866 Ernst Haeckel) výrazne prispel nemecký geograf, geológ, botanik, a cestovateľ **Alexander von Humboldt** (1769 – 1859), ktorý sa zúčastnil viacerých expedícií v trópoch Latinskej Ameriky (obr. 2.3). Okrem úžasnej druhovej rozmanitosti si všímal vplyvy rôznych faktorov prostredia, najmä klimatických a geologických, na rozšírenie druhov. Život tropických organizmov a faktory naň pôsobiace opísal vo veľkolepom mnohozväzkovom diele. Pri svojom výskume spájal precízne pozorovania, rozsiahly zber údajov a kvantitatívne hodnotenia s celostným pohľadom na prírodu. Najmä časť *Kozmos* je hľadaním **spoločných jednotiacich princípov**, ktoré sú skryté za rozmanitosťou prírodných javov (WALLS 2009), napr. funkciu riek v krajine prirovnal ku krvnému obehu organizmu. Humboldt vnímal spoločnú genézu **živých organizmov, klímy a zemskej kôry** a jeho práce sa stali základom nového vedného odboru, biogeografie. Jeho vnímanie pradiva života a vízia jednoty všetkého živého vedúca k celostnému pohľadu na prírodu sa stali aj inšpiráciou moderného environmentálneho hnutia (WULF 2016).

Obr. 2.3. Alexander von Humboldt na úpätí sopky Chimborazo (dnešný Ekvádor), na ktorú vystúpil do výšky 5 875 m n.m. Jej vrchol (6 236 m n. m.) je najvzdialenejším bodom od stredu Zeme, keďže sopka leží na rovníku. *Autor maľby:* Friedrich Georg Weitsch, 1806. *Zdroj:* de Benutzer APPER, Public Domain.

Anglický prírodovedec **Charles Darwin** (1809 – 1882) sa zúčastnil expedície na lodi Beagle (1831 – 1836), kde študoval vzťahy medzi variabilitou organizmov a ich prostredím v Južnej Amerike, Austrálii a na ostrovoch Nového Zélandu, Galapág a inde. V revolučnom diele „O pôvode druhov" (DARWIN 1859) prezentoval zásadnú **teóriu biologickej evolúcie organizmov,** pochádzajúcich zo spoločného predka. Jej základným kameňom je náhodná variabilita, premenlivosť organizmov (až oveľa neskôr vysvetlená náhodnými mutáciami, ktoré môžu byť dôsledkom chybného prepisu DNA alebo pôsobenia vonkajších faktorov), na ktorú nadväzuje mechanizmus prírodného výberu. V ňom sa v procesoch konkurencie organizmov zachovávajú funkčné výhody vytvorené náhodnými zmenami. To znamená, že v populácii prežívajú a rozmnožujú sa organizmy lepšie adaptované k prostrediu a svoje gény prenášajú do ďalších generácií. Tým, že Darwin priniesol do biológie obraz prakticky neustáleho evolučného vývoja organizmov, výrazne zmenil dovtedajšie predstavy o prírode.

Tézu, že zdrojom inovácie je iba náhodná variabilita považujú niektorí vedci za redukcionistickú, upozorňujúc, že naopak, genetická informácia musí byť odolná voči pôsobeniu chemických zmien. Navyše, okrem konkurencie sa v prírode uplatňujú aj mechanizmy symbiózy a koevolúcie a podľa niektorých autorov dokonca prevažujú (ROSE 1997; MARGULIS 2005). Pre objektívnosť však treba dodať, že aj sám Darwin písal o mechanizmoch koevolúcie (napr. opeľovanie rastlín špecifickými druhmi hmyzu).

Spomeňme tiež francúzskeho prírodovedca, matematika a kozmológa **Georges-Louisa Leclerc Comte de Buffona** (1707–1788), ktorý vo svojom životnom diele *Histoire naturelle* pojednával aj o závislosti organizmov na vonkajšom prostredí a ovplyvnil dve generácie prírodovedcov. Medzi nich patrí

aj botanik a zoológ **Jean-Baptiste Lamarck** (1744 – 1829), ktorý ešte pred Darwinom písal o postupnom zvyšovaní zložitosti organizmov v priebehu evolúcie a o dedičnosti ich adaptácie k podmienkam prostredia. Čiastočne mu za pravdu dáva teória epigenetiky, ktorá skúma zložité biochemické mechanizmy, ktoré v závislosti od podmienok prostredia ovplyvňujú konkrétne fyzické vyjadrenie génov.

Na prepojenie rastlín a živočíchov, ale aj geologického substrátu v komplexnom celku živého sveta upozornil rakúsky geológ a paleontológ **Eduard Suess** (1831 – 1914), ktorý prvý použil termín **biosféra,** pričom zdôraznil význam jej interakcií s litosférou a atmosférou**.** Ruský vedec, mineralóg a geochemik **Vladimír Ivanovič Vernadskij** (1863 – 1945) spájal prírodovedu s filozofiou a prišiel s koncepciou **noosféry** – sféry premenenej človekom ako ďalšieho vývojového štádia Zeme nasledujúceho po geosfére a biosfére.

K prvým vedcom študujúcim rastlinné spoločenstvá ako zložité komplexy organizmov patrili dánsky botanik **Christen Christensen Raunkiær** (1860 – 1938), ktorého sústava životných foriem rastlín sa stále využíva pri charakterizovaní ich spoločenstiev (RAUNKIÆR 1934) a **Josias Braun-Blanquet** (1884 – 1980), botanik a fytocenológ švajčiarskeho pôvodu, ktorý navrhol moderný spôsob klasifikácie vegetácie podľa druhového zloženia spoločenstiev a abundancie zastúpených druhov (BRAUN-BLANQUET 1932).

Pre systémovú ekológiu je tiež významný prínos amerických botanikov: **Henry Chandler Cowlesa** (1869 – 1939), ktorý prvý študoval sukcesiu vegetácie a predovšetkým **Frederica Clementsa** (1874 – 1945), pre ktorého biocenóza nebola zoskupením intaktných, ale vzájomne interagujúcich prvkov, ktoré sú základom jej dynamiky, vytvárajúc akýsi „*superorganizmus*“. Rozvinul **teóriu sukcesie** ako postupných necyklických vývojových zmien vegetácie spontánne vedúcich ku klimaxu. V priebehu tohto procesu sa na stanovišti vystrieda viac rôzne dlho trvajúcich sukcesných štádií vývoja biocenózy, pričom **klimax** označuje štádium, ktoré je najoptimálnejšie vzhľadom k abiotickým podmienkam stanovišťa, najmä vo vzťahu ku klimatickým podmienkam – klimatický klimax (CLEMENTS 1916; BEGON et al. 1997; KURAS 2013).

Tých, ktorí prispeli k vývoju systémového ekologického pohľadu je viac. Napr. zakladateľ limnológie, švajčiarsky vedec **François-Alphonse Forel** (1841 – 1912), študoval v jazerách interakcie organizmov s vlastnosťami ich prostredia. Americký zoológ **Victor Ernest Shelford** (1877 – 1968) študoval vzťahy živočíchov s prostredím a definoval zákon tolerancie. Anglický botanik, fytocenológ a významný ekológ, **Arthur George Tansley** (1871 – 1955) odmietol obraz spoločenstva ako superorganizmu. Namiesto neho definoval pojem ekosystém ako základnú ekologickú jednotku, ktorej komponentami nie sú iba organizmy, ale aj zložky ich abiotického prostredia (TANSLEY 1935). Americký matematik a biofyzik **Alfred James Lotka** (1880 – 1949) a taliansky matematik a fyzik **Vitto Volterra** (1860 – 1940) nezávisle od seba vytvorili prvé modely systému konkurenčných druhov a systému predátor – korisť.

Kým v 20. a 30. rokoch 20. storočia sa pozornosť venovala najmä štúdiu populácií, od 30. rokov sa objavujú snahy o komplexné štúdium celých spoločenstiev a od polovice minulého storočia došlo k výraznému rozvoju ekológie. V modernej biológii sú ukážkou systémového prístupu práce britského teoretického biológa **Josepha Henryho Woodera** (1894 – 1981), ktorý hľadal spoločné organizačné princípy živých štruktúr, hierarchií a vzniku nových vlastností. Anglický zoológ **Charles Sutherland Elton** (1900 – 1991) považoval za integrujúci faktor spoločenstiev potravné reťazce (ELTON 1927) a prvý definoval ekologickú niku ako základnú funkčnú rolu, postavenie organizmu v spoločenstve (ELTON 1958).

Modernú ekológiu odštartovali práce amerického biológa a ekológa **Eugena Pleasants Oduma** (1913 – 2002), ktorý definoval **ekológiu ako integrujúcu vedu** skúmajúcu hierarchicky vyššie úrovne organizácie ako sú organizmy, s cieľom porozumieť štruktúre aj funkciám ekosystémov (ODUM 1977, 1977b). Spoločne s bratom, systémovým ekológom, **Howardom Thomasom Odumom** (1924 – 2002), napísal populárnu učebnicu „Základy ekológie“ (*Fundamentals of Ecology*), v ktorej priblížil aj princípy hierarchickej organizácie prírody, od génov cez organizmy až po biologické spoločenstvá a ekosystémy (ODUM 1953). (O vysokom ocenení tejto učebnice v odbornej verejnosti svedčí, že sa dočkala opakovaných vydaní.)

Samozrejme, tento výpočet je z priestorových dôvodov skôr ilustratívny ako úplný. Podstatné je, že postupné prenikanie systémového prístupu do prírodných a sociálnych vied podmienilo rozsiahle, priam paradigmatické zmeny v chápaní ekológie a viedlo k vzniku systémovej ekológie.

2.1.3 Ekológia a systémová ekológia

Ako sme už uviedli v kapitole 1 pojem ekológia ako prvý definoval nemecký biológ **Ernst Haeckel** (1834 – 1919) v roku 1869 ako vedu o vzťahoch medzi organizmami a ich prostredím a medzi organizmami navzájom. Systémovejšia definícia od Eugena ODUMA (1977) hovorí, že **ekológia je veda o štruktúre a funkciách prírody**. Americký ekológ **Robert Leo Smith** ju rozvinul takto: *„Štruktúra zahŕňa rozšírenie a početnosť organizmov, ktoré ovplyvňujú abiotické a biotické faktory prostredia a funkcie zahŕňajú všetky aspekty ich rastu a interakcií ich populácií“* (SMITH 1996).

V súvislosti s tým, že dnes sa zdôrazňuje vysoká dynamika prírodných procesov (viac v kapitole 6) je vhodné zvážiť prípadné ďalšie rozšírenie resp. upresnenie Odumovej a Smithovej definície, napríklad nasledovne: **Ekológia je veda o štruktúre, dynamike a funkciách prírody,** pričom

- štruktúra zahŕňa rozšírenie a hojnosť jednotlivých druhov organizmov, ako aj ekosystémov,
- dynamika zahŕňa všetky aspekty ich životných dráh a vývojových cyklov, vrátane rastu, vývoja reprodukcie alebo obnovy, interakcií a ich zmien,
- funkcie zahŕňajú vlastnosti a úlohy organizmov v ekosystéme, ako aj jednotlivých ekosystémov v krajine a Zemskom systéme.

Tie funkcie prírody, ktoré ľudská spoločnosť využíva, sa nazývajú ekosystémové služby.

Eugen Odum vnímal ekológiu **ako integrujúcu vedu**, ktorá umožňuje študovať interakcie na viacerých úrovniach organizácie živých systémov. Výber vhodnej hierarchickej úrovne ekologického výskumu závisí od otázok, na ktoré hľadáme odpoveď. Môžeme študovať napr. biodiverzitu, adaptácie organizmov, dynamiku populácií, medzidruhové vzťahy v spoločenstve, produkciu biomasy v ekosystéme, sukcesiu a disturbancie alebo genézu krajiny. Tiež, ekosystémy môžu mať rôznu hierarchickú úroveň, hierarchicky najvyššiu známu organizačnú úroveň má Zemský ekologický systém (často nazývaný Zemský systém).

Integrujúci význam ekológie plasticky vystupuje najmä pri riešení závažných environmentálnych problémov, napr. význam celoplanetárneho uhlíkového cyklu vo vzťahu ku zmene klímy alebo význam trofických vzťahov v ekosytémoch pri riešení regionálnych problémov úbytku biodiverzity.

Problém je, že pojmy ekológia a ekológovia sa vo verejnosti často používajú nesprávne na označenie aktivít a ľudí, ktorí sa zasadzujú za ochranu životného prostredia. V tomto prípade je správne označenie **environmentálny aktivizmus** a environmentálni aktivisti. Je síce pravda, že mnoho ekológov (odborníci, ktorí sa zaoberajú ekológiou) sa angažuje za ochranu prírody a krajiny, avšak neplatí to všeobecne.

Členenie ekológie

Súčasná ekológia predstavuje komplexnú a diverzifikovanú vednú oblasť, ktorá skúma interakcie, rozšírenie a početnosť organizmov, ako aj toky energií, obeh hmoty a toky informácií, s cieľom porozumieť štruktúram a procesom v živej prírode (STORCH & MIHULKA 2000). Člení sa na množstvo pododborov, ktoré používajú často osobitné metodické prístupy, postupy a nástroje (ELIÁŠ 2007):

- **Členenie podľa skúmaných organizmov**, napr. ekológia rastlín, ekológia živočíchov, suchozemských organizmov, vodných organizmov, mikroorganizmov, aj ekológia človeka.
- **Členenie podľa typov ekosystémov,** napr. ekológia terestrických ekosystémov, morských, sladkovodných ekosystémov, lesnícka ekológia, ekológia oráčinových ekosystémov, urbánna ekológia a pod.
- **Členenie podľa skúmanej úrovne hierarchie,** napr. ekológia na úrovni organizmu (autekológia), populácií (demekológia), ekológia druhu, spoločenstiev (synekológia), ekosystémov, krajinná ekológia a na úrovni Zemského ekosystému (planetárna ekológia).
- **Členenie podľa charakteru a využitia poznatkov,** napr. teoretická ekológia, aplikovaná ekológia, ochranárska ekológia (označovaná aj ako biológia ochrany prírody), obnovná ekológia (zameraná na obnovu integrity ekosystémov), porovnávacia ekológia, evolučná ekológia, environmentálna ekológia (výskum vplyvov človeka na životné prostredie), systémová ekológia resp. matematická ekológia.

Systémová ekológia

Ekológia je už svojou podstatou systémová veda, keďže sa zaoberá fyzickou štruktúrou a funkciami ekologických systémov (ODUM 1964), ktorých celky vznikajú a vyvíjajú sa vzájomnými interakciami ich prvkov a ich interakciami s prostredím, ktoré všetky prvky prepájajú a integrujú do funkčného celku (napr. druhy v ekosystéme). Môžeme však povedať, že aplikovanie teórie systémov a kybernetických princípov na živú prírodu kulminuje práve v systémovej biológii a systémovej ekológii.

Systémová biológia sa venuje výskumu zložitej organizácii biologických systémov (KIRSCHNER 2005), kladie dôraz na výskum interakcií a procesov, ktoré sa uskutočňujú na fyzickej štruktúre organizmu a na výskum pravidiel organizácie jednotlivých komponentov organizmu do zložitého a funkčného celku. **Systémová ekológia** sa pôvodne vynorila ako jedna z disciplín ekológie koncom 60. rokov 20. stor., aplikujúc idey a nástroje matematiky, počítačovej vedy, kybernetiky, všeobecnej teórie systémov a pod.

Jednu z prvých definícií systémovej ekológie prezentoval VAN DYNE (1966): „*Systémovú ekológiu možno v širšom slova zmysle definovať ako štúdium vývoja, dynamiky a narušenia ekosystémov*". Keďže environmentálne problémy vznikajú zväčša narušením zložitých prírodných systémov a zriedka majú iba jedinú príčinu, ale často ide o synergiu viacerých faktorov. Pre ich pochopenie i pre udržateľný manažment a ochranu ekosystémov je potrebné aj štúdium systémových ekologických princípov.

Podľa Oduma „***systémová ekológia je štúdium celkov ekosystémov*** *a zahŕňa merania ich celkovej výkonnosti, rovnako ako štúdium detailov ich systémového dizajnu, prostredníctvom ktorého sa realizuje ich celkové správanie z jednotlivých častí a mechanizmov*" (Odum 1994 in BORRETT & FATH 2014). Táto definícia zdôrazňuje výskum celostných aspektov ekosystému a vyplýva z nej, že celkové správanie systému je spojené s tým, ako celok riadi svoje jednotlivé časti a tým zabezpečuje ich koherenciu.

Podľa JØRGENSENA (2012) „***systémová ekológia sa zameriava na vlastnosti ekosystémov*** *a snaží sa ich odkrývať prostredníctvom systémového prístupu – vidieť les cez stromy. Možno ju tiež označiť ako teóriu ekosystémov...*". Systémová ekológia sa ako holistická interdisciplinárna veda nezaoberá len štruktúrou, dynamikou a funkciami zložitých ekologických systémov, ale aj ich emergentnými vlastnosťami a predovšetkým **hľadaním spoločných, jednotiacich princípov organizácie** ekosystémov. Kladie dôraz na štúdium a aplikáciu systémových princípov, ktoré pôsobia analogicky na rôznych hierarchických úrovniach organizácie systému a tým prináša nové pohľady a porozumenie fungovania organizmov, ekosystémov, ale aj zložitých sociálnoekologických systémov (v ktorých sa uplatňuje aj vplyv človeka).

Systémová ekológia teda **môže prinášať nové vhľady do fungovania ekosystémov, krajín a regiónov** ako zložitých a vysoko integrovaných celkov. Umožňuje modelovať ich štruktúru a dynamiku, vrátane vplyvov prírodných aj antropogénnych narušení (reálnych aj potenciálnych), zvažovať prenos týchto vplyvov medzi prvkami ekosystému (alebo sociálno-ekologického systému) a ich vzájomnú synergiu (napr. zosilňovanie súčasnej zmeny klímy v dôsledku úbytku biodiverzity a zmeny krajinnej štruktúry, čo platí aj naopak). Následne je možné vytvárať a analyzovať scenáre možného vývoja týchto systémov a tým hľadať a nachádzať efektívnejšie riešenia ich manažmentu (na Slovensku sa napr. prognózovaniu scenárov vývoja biodiverzity venujú POVAŽAN et al. 2020). Nestor systémovej ekológie Sven Erik JØRGENSEN (2012) zdôrazňuje potrebu vybudovania silnej a široko aplikovateľnej teórie ekosystémov, ktorá by bola schopná nielen vysvetľovať ich pozorovania, ale umožniť aj kvantifikované prognózy ich vývoja.

Organizmus ostáva základným prvkom organizmus. Systémová ekológia však kombinuje pohľady na jednotlivé organizmy, ich adaptácie, niky a interakcie s pohľadmi na organizáciu hierarchicky vyšších celkov – populácií, spoločenstiev a ekosystémov, ich dynamiku a životné cykly (napr. vývojové cykly lesa), vlastnosti, **kladúc dôraz aj na princípy tejto organizácie**. Za týmto účelom skúma aj makroskopické premenné, ako sú toky energie, hmoty a informácie medzi biologickými alebo ekologickými entitami (napr. organizmami, populáciami, biocenózami, ekosystémami či ekoregiónmi), ktoré ich integrujú do vyšších celkov. Systémová ekológia skúma nielen tieto toky, ale aj faktory, ktoré ich ovplyvňujú (CHAPIN et al. 2002), a tiež interakcie, ktoré vedú k emergentným vlastnostiam ekologických systémov.

Princíp vzniku emergentných vlastností spôsobuje, že živé systémy majú na každej hierarchickej úrovni vždy nové **atribúty, ktoré nenájdeme na nižších úrovni ach ich organizácie.** Nemožno ich odvodiť sumáciou vlastností prvkov systému, pretože sú výsledkom interakcií týchto prvkov. Tieto nové kvality sa stanú zjavnými až vtedy, keď systém skú mame ako celok. Práve objasnenie zložitých vzťahov medzi štruktúrou, interakciami prvkov a emergentnými vlastnosťami zložitého živého systému, s cieľom lepšie porozumieť jeho správaniu, dnes patrí k veľkým výzvam biológie a ekológie.

Príklad ekologického výskumu v severnom Podpoľaní

Dlhoročný výskum vedcov zo Slovenskej akadémie vied a univerzít (TU Zvolen a UMB Banská Bystrica) v severnom Podpoľaní v rokoch 2009 – 2019 bol zameraný na porovnávanie vplyvov rôzneho manažmentu na druhové zloženie pasienkových travinných spoločenstiev. V súvislosti so zmenami vo využívaní pôdy a opúšťaním obhospodarovania lúk a pasienkov totiž ochranári hľadajú cesty ako zachovať druhovú rozmanitosť ich spoločenstiev. Vzhľadom k tomu, že ide o výskum toho, ako jednotlivé formy manažmentu ovplyvňujú štruktúru jednotlivých celkov travinných spoločenstiev a ich emergentné vlastnosti (v tomto prípade druhovú diverzitu), možno ho považovať za výskum na rozhraní botaniky a systémovej ekológie.

Obr. 2.4. Ekologický výskum vedcov na pasienkoch v severnom Podpoľaní (zo Slovenskej akadémie vied, Technickej univerzity vo Zvolene a Univerzity Mateja Bela v Banskej Bystrici). *Foto:* © Peter Sabo, 2013.

Experiment zahŕňal šesť režimov hospodárenia – pasenie s nízkou intenzitou (extenzívne), pasenie spojené s jesenným mulčovaním, ručné kosenie na jar kombinované s pasením, jesenné mulčovanie s vylúčením pasenia, jarné mulčovanie bez pasenia a bezzásahové kontrolné plochy. Prvé trendy v zmene a vývoji funkčného floristického zloženia sa štatisticky vyhodnotili po 7 rokoch pomocou údajov o znakoch (*traits*) rastlín z medzinárodných databáz LEDA, CLO-PLA, BiolFlor a KEW.

Kosenie kombinované s pasením a pasenie kombinované s jesenným mulčovaním nevykazovali výrazné časové trendy. Najvýznamnejšie zmeny boli pozorované pri jesennom mulčovaní bez pasenia a v bezzásahovom režime, kde klesalo zastúpenie jednoročných rastlín (terofytov), R stratégov a rastlín s prízemnou ružicou listov, zatiaľ čo narastal počet rastlín s vegetatívnym rozmnožovaním. Výrazné zmeny boli pozorované aj pri machoch. Klesajúcu frekvenciu výskytu a pokryvnosť vykazovali druhy *Abietinella abietina, Climatium dendroides a Thuidium asimile,* kým *Plagiomnium affine a P. cuspidatum* mali opačný trend. Oba tieto typy manažmentu boli vyhodnotené ako negatívne.

Jarné mulčovanie je z krátkodobého a strednodobého hľadiska uskutočniteľnou alternatívou, nemalo by sa však považovať za dlhodobú alternatívu. Mulčovanie však môže byť vhodnou stratégiou pre poloprírodné oligotrofné travinné porasty, ak sa použije v kombinácii s pasením. Pre spoločenstvá machorastov je efektívne odstraňovanie nadzemnej biomasy cievnatých rastlín pasením a/alebo kosením.

Môžeme zhrnúť, že súčasná **systémová ekológia** je interdisciplinárna disciplína, ktorá **študuje štruktúru, správanie a emergentné vlastnosti ekologických systémov ako zložito organizovaných a vysoko dynamických funkčných celkov.** K ich štúdiu využíva systémový a celostný prístup. Aplikácia teórie systémov prináša do tohto odvetvia ekológie princípy informačných signálov a spätnej väzby, koncepciu sietí

a hierarchií, zákony termodynamiky a nerovnovážnu perspektívu. Sústreďuje sa na štúdium tokov hmoty, energie a informácie v ekosystéme a na ich transformácie, pričom sa snaží porozumieť zložitým vzťahom medzi fyzickou štruktúrou systému, na nej realizovanými procesmi a správaním celku.

Táto snaha o porozumenie zložitosti organizácie živej hmoty je súčasťou novej, vynárajúcej sa paradigmy. Odkrývanie spoločných organizačných princípov vedie k zvýrazneniu úlohy informácie, ktorá je v ekologických štúdiách zatiaľ zväčša podceňovaná napriek tomu, že na vývoji a udržiavaní ekologických systémov sa nepodieľajú iba toky hmoty a energie. Aj *„informácia je fundamentálna pre život a živé systémy, od úrovne procesov v bunke až po biosféru*“, tvrdia O´CONNOR et al. (2019). (Informácii ako významnému prírodnému aj kultúrnemu zdroju sa podrobnejšie venujeme v kapitole 4.3).

Priekopníkmi systémovej ekológie na Slovensku sú najmä Ján Drdoš, Milan Ružička, Ladislav Miklós a Zita Izakovičová, ktorí systémové princípy premietali predovšetkým do výskumu v oblasti krajinnej a environmentálnej ekológie (napr. DRDOŠ et al. 1980; IZAKOVIČOVÁ et al. 1997). RUŽIČKA (2002) u nás ako prvý premietol poznatky z teórie systémov do ekológie, vysvetľujúc základné vlastnosti a možnosti vyjadrenia systémov, procesy systémovej analýzy a syntézy. Systémový prístup uplatnil najmä pri výskume a hľadaní riešení krajinnoekologických problémov, osobitne v rámci originálnej metodiky priestorovej optimalizácie využívania krajiny LANDEP, ktorá zahŕňa krajinnoekologické analýzy a syntézy a následné evalvácie (vyhodnotenia) a propozície (návrhy) smerujúce k modelom a návrhom ekologicky optimálneho využívania územia (RUŽIČKA 2000). MIKLÓS (1992) sa zameral na identifikáciu a navrhovanie územných systémov ekologickej stability v krajine, pričom krajinu vyjadril prostredníctvom pôvodnej koncepcie geosystému (MIKLÓS L. & IZAKOVIČOVÁ 1997; MIKLÓS 1998).

Ako sme však už načrtli, považujeme za potrebné zdôrazniť, že systémový a celostný prístup nemá z ekológie vytlačiť redukcionistické analytické metódy a postupy, ktoré pri výskume prírody, vrátane vzťahov v ekosystémoch majú svoje miesto. V redukcionistickom pohľade síce nemôžeme vysvetliť správanie vyšších hierarchických úrovní (napr. ekosystémov) iba analýzou správania prvkov nižších úrovní (napr. miestnych populácií), ale to neznamená, že podrobné štúdium týchto prvkov nemá význam. **Oba smery, redukcionistický ako aj systémový preto treba vnímať ako dôležité a vzájomne sa doplňujúce.**

2.1.4 Čo je to zložitosť, komplexita prírodných systémov?

Súčasťou novej vynárajúcej sa paradigmy je aj snaha o **porozumenie zložitosti organizácie neživej aj živej hmoty**. Vysokú zložitosť, komplexitu organizácie prírodného systému (z lat. „*com*“ – spolu a „*plex*“ – tkaný) charakterizuje prítomnosť veľkého počtu prvkov a ich rozmanitosť, rozmanitosť ich interakcií, procesov a sieťových štruktúr, ako aj vysoká dynamika a nelinearita správania sa celku systému.

Tieto štruktúry sa spontánne vnárajú, integrujú do zložitejších celkov, vytvárajúc zložité postupnosti hierarchií (PROULX 2007). Na každej novej úrovni hierarchie sa vynárajú nové, tzv. **emergentné vlastnosti** systému (ODUM 1977) – zložitosť smerom k vyšším hierarchickým úrovniam spontánne rastie. Tieto vlastnosti sú výsledkom interakcií medzi prvkami v rámci rôznych hierarchických úrovní aj medzi týmito úrovňami navzájom. Čím väčší je počet hierarchických úrovní, tým je systém zložitejší.

PAULOV (2002) považuje komplexitu *„za jeden z najvýznamnejších atribútov nášho sveta... Pod narastaním komplexity treba rozumieť narastanie vnútornej komplexity, organizácie, narastanie komplexného správania“.* **Podstatou koncepcie komplexity je idea spontánnej autoorganizácie jednotlivých prvkov prostredníctvom ich vzájomných interakcií do vyšších funkčných celkov** (obr. 2.3). To predpokladá jednotnú organizačnú tendenciu zoskupovania prvkov do zložitejších systémov, ktorá vystupuje analogicky na rôznych hierarchických úrovniach organizácie života.

K priekopníkom štúdia komplexity v biológii patrí francúzsky prírodovedec **Jean Baptiste de Lamarck** (1744 – 1829), ktorý koncom 18. storočia prišiel s názorom, že existuje „vnútorný drajv“ postupného zvyšovania zložitosti organizmov. Biológiu definoval ako štúdium živých organizmov, ich organizácie, procesov vývoja a štrukturálnej zložitosti (in GOLDSMITH 1996). Jeho predstava evolúcie je však

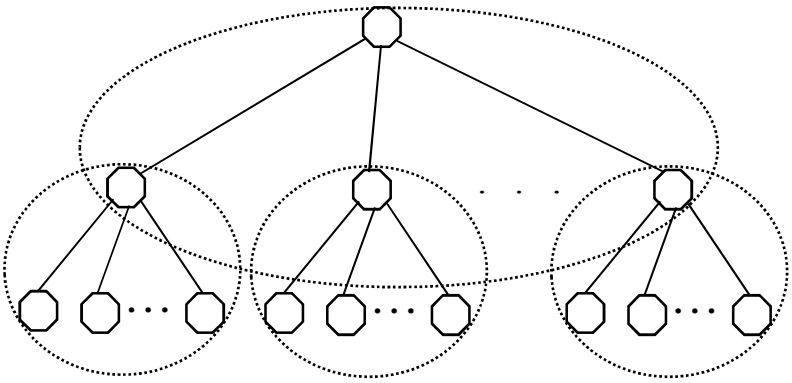
zjednodušená, na rozdiel od Darwina veril, že nie druh, ale organizmus získava nové vlastnosti (v dôsledku zmien prostredia, ktorým prispôsobuje svoje správanie) a následne ich prenáša na potomkov. Súčasný výskum v epigenetike mu čiastočne dáva za pravdu v tom, že potomkovia môžu v dôsledku epigenetických zmien organizmu vyvolaných prostredím, dediť aj takto získané nové vlastnosti.

Vývoj teórie zložitosti, komplexity a jej aplikácií sa pôvodne orientoval najmä na konštruovanie výkonných superpočítačov a na výskum zložitosti ľudského mozgu (CAPRA 1997). Postupne sa však objektom štúdia princípov zložitosti viac stávajú práve biologické, ekologické, sociálne a ekonomické systémy, ktoré charakterizuje práve ich vysoká zložitosť (MIKULECKY 1995; KAY 2000, 2002; PROULX 2007).

Moderná koncepcia zložitosti

Moderná koncepcia zložitosti, komplexity, ako úrovne zložitosti organizácie systému prehlbuje všeobecnú teóriu systémov, skúmajúc spôsoby, akými vysoko zložité systémy vznikajú, organizujú sa, udržiavajú a rozvíjajú. Ide o systémy, ktoré sa vyznačujú vysokými počtami a rozmanitosťou ich prvkov, interakcií a procesov. Využívajú sa pritom nástroje matematiky (napr. diferenciálne rovnice na opísanie nelineárnych javov, pravdepodobnosť a štatistika, komplexné čísla, fuzzy logika), ale aj spätné väzby, teória chaosu a kybernetické princípy, ktoré spolu umožňujú analyzovať kvalitatívne vlastnosti týchto systémov. (Ich podrobné predstavenie presahuje rámec tohto textu, pre záujemcov niektoré dôležité nástroje na opis zložitosti a ich význam približuje v knihe Pradivo života Fritjof CAPRA, 1997).

Ku komplexite teda patrí aj hierarchické usporiadanie systémov, ktoré si vyžaduje funkčné väzby a interakcie tak v rámci jednotlivých hierarchických úrovní, ako aj medzi nimi (obr. 2.5). Živé systémy rôznych hierarchií sa odlišujú stupňom komplexity svojej štruktúry a /alebo komplexity svojich funkcií a správania (napr. zložitosť celku telesného orgánu je vyššia ako zložitosť tkaniva alebo pletiva), ale rôznu komplexitu môžu mať aj systémy rovnakej hierarchickej úrovne (napr. ekosystém tropického pralesa vz. púštny ekosystém, mokraďový ekosystém vz. ekosystém horského plesa).



Obr.2.5. Náčrt vývoja zložitosti autoorganizujúceho sa systému. Prvky (v schéme na rovnakej hladine) sú početné, vzájomne interagujú a tým sa organizujú do vyššieho funkčného celku (v schéme je ohraničený prerušovanou kružnicou). Vzorec organizácie týchto celkov sa na danej úrovni hierarchie opakuje a ďalšou integráciou sa tieto celky samy stávajú prvkami hierarchicky vyššieho systému.

Môžeme zhrnúť, že k prejavom komplexity patrí početnosť a diverzita prvkov systému, diverzita ich interakcií a procesov, zložitosť funkcií a správania systému a vznik emergentných vlastností na každej úrovni hierarchického usporiadania živého systému. Spolu s emergentnými vlastnosťami sa vždy vynárajú aj nové zákonitosti, vzorce a obrazce *(pattern*) usporiadania štruktúry a správania. Význam celostného prístupu v biológii a ekológii vo vzťahu k týmto vzorcom vystihol chemik a filozof Michael Polanyi: *„všetky časti sa stanú nezmyselné, ak stratíme so zreteľa vzorec, ktorý spolu vytvárajú“* (ex in ROSE 1998).

Sebapodobnosť ako prejav zložitosti, geometria fraktálov prírode

K nástrojom pre výskum zložitosti patrí aj **fraktálna geometria,** ktorej autorom je francúzsky matematik **Benoit MANDELBROT** (1982). Mnohé z prírodných objektov totiž charakterizuje podobnosť geometrických tvarov v rôznych mierkach ich štruktúry. To znamená, že keď fraktál rozdelíme na menšie časti, tie sa tvarom podobajú celku, ktorý vzniká ich mnohopočetným opakovaním (napr. skala pripomína vrch, konár strom). To prináša určité zákonitosti a vzorce usporiadania do zdanlivého „chaosu“ rôznych tvarov.

Známymi príkladmi sú oblaky, blesky, reliéf pohorí, tvar pobrežia, kryštály, snehové vločky, kvaple v jaskyni (obr. 2.6), riečne siete, lastúry, žilnatina listov, vetvenie drevín, štruktúra pľúcneho tkaniva, krvného obehu a iné. Americkí vedci sa napr. zaoberajú fraktálnym charakterom vetvenia a rozmiestnenia drevín v tropickom pralese – poukazujúc na to, že to, čo vyzerá ako „náhodne rozhádzané stromy“ má v skutočnosti zložitú štruktúru, ktorú dokážeme uchopiť iba s pomocou počítačového modelovania. Počet stupňov rastu prírodných fraktálov (napr. počet rádov vetvenia stromu) je však vždy limitovaný.

Obr. 2.6. Fraktály sa vyskytujú hojne v živej aj v neživej prírode. Aj krása jaskýň je výsledkom mnohonásobných opakovaní určitých fraktálnych foriem (ktoré sú rovnaké na viacerých úrovniach výstavby jej štruktúry). K obľúbeným patrí Národná prírodná pamiatka Demänovská jaskyňa Slobody. Jej neživý, ale dynamický systém formujú voda (zrážky a potok Demänovka), prísun CO_2, zloženie sedimentárnych hornín aj reliéf povrchu hory. Výsledná zdanlivo chaotická štruktúra obsahuje úchvatné fraktálne tvary.
Foto: © Peter Sabo, 2013.

Zložitosť živých systémov

Ako sme už načrtli, vysoká zložitosť usporiadania, vysoká komplexita, patrí k základným charakteristikám živých systémov. Rozlišujú sa jej dva aspekty: 1) **štrukturálna zložitosť (komplexita)** – počty a rozmanitosť prvkov a ich interakcií, hĺbka a priestorový rozsah hierarchií – a 2) **funkčná (behaviorálna) zložitosť** – počty a rozmanitosť procesov resp. postupností stavov systému, ktoré sú obrazom správania celku, a ktoré mu dávajú identitu. K obrazu zložitosti nepatrí iba početnosť a variabilita prvkov a procesov, ale aj ich integrácia podľa jedinečných organizačných vzorcov zabezpečujúca funkčnosť celku. Živé systémy majú v priebehu svojho rastu (resp. sukcesie) aj evolúcie tendenciu k rastu zložitosti.

Môžeme zhrnúť, že zložitosť biologických a ekologických systémov sa prejavuje v raste ich fyzickej, štrukturálnej a / alebo funkčnej (behaviorálnej) komplexity v priebehu ich rastu, vývoja a reprodukcie. LÉVÉQUE & MOUNOLOU (2003) definujú tzv. **biokomplexitu** ako produkt veľkého počtu funkčných interakcií medzi biologickými entitami na všetkých úrovniach organizácie, ako aj interakcií s ich fyzickým, chemickým, biologickým a sociálnym prostredím. Aj spomínaná biologička Rachel Carson pri svojej kritike používania pesticídov vychádzala z predpokladu, že organizmy sú príliš zložité na to, aby sme mohli presne zhodnotiť, aké škody v nich rezíduá človekom používaných pesticídov môžu narobiť.

Iní autori dávajú prednosť termínu **ekologická komplexita**, ktorý vyjadruje štrukturálnu a funkčnú zložitosť ekologických systémov. Napr. PROULX (2007) sumarizuje princípy systémového prístupu v ekologických štúdiách. Prvým je neurčitosť prognóz správania sa zložitých ekosystémov, ktorá vyplýva z nedostatku poznania o premenných, ktoré udržiavajú integritu ekosystému. Dôvodom je priveľký počet biologických prvkov a premenných, ktoré znemožňujú formulovanie všeobecných uzáverov zo špecifických výskumov. Druhým princípom je zložitá dynamika takýchto systémov v priestore a v čase.

Spontánny vznik a vývoj hierarchického usporiadania živých systémov je podmienený početnosťou a rozmanitosťou prvkov sytému, aj rozmanitosťou interakcií a ich vzájomnou súhrou, t.j. vzájomným posilňovaním ich koherencie a synchronizáciou ich pôsobenia – táto cesta vzniku novej kvality sa niekedy označuje synergéza (IVANIČKA 1997). Aj biodiverzita prírodných a poloprírodných systémov je produktom nespočetných interakcií v rámci rôznych úrovní organizácie živých systémov a medzi nimi.

Podľa LEVINA (2005) hľadanie odpovede na otázku ako zložité adaptívne ekologické systémy a ich emergentné vlastnosti (ako je napr. veková štruktúra a priestorová distribúcia a hojnosť druhov v ekosystéme resp. ich trofické nároky) vznikajú prostredníctvom interakcií, ktoré prebiehajú na organizačne nižších hierarchických úrovniach, patrí ku kľúčovým témam výskumu v ekológii.

Význam porozumenia ekologickej zložitosti

Výskum ekologickej komplexity je multidisciplinárny, spája teórie, metodiky a nástroje z oblastí matematiky, kybernetiky, ekonomiky, biologických a ekologických vied. Princípmi ekologickej komplexity, napr. otázkami hierarchií, emergentných vlastností, dynamickej rovnováhy a autoregulácie sa budeme podrobnejšie zaoberať v osobitných kapitolách (kap. 5 a kap. 6). Na Slovensku sa otázkami ekologickej zložitosti zaoberali napr. PAVLÍK & PAVLÍK (2001), LEHOTSKÝ et al. (2008), CEBECAUEROVÁ & LEHOTSKÝ (2012).

Podľa JØRGENSENA (2012) ak budeme schopní lepšie systémovo porozumieť fugovaniu ekosystémov, dokážeme postupne vytvoriť aj ich ucelenú teóriu. Táto teória má byť základom na (obmedzenú) predikciu ich správania, aj napriek tomu, že ide o vysoko zložité systémy. Cieľom bude lepší manažment ekosystémov, či už v v prípade chránených území alebo pri využívaní biologických zdrojov. Lepšie porozumenie zložitosti živých systémov nám teda pomôže vytvoriť nové nástroje, ktoré by mali byť adekvátnejšie k súčasným veľkým environmentálnym, sociálnym a ekonomickým výzvam.

V novom systémovom pohľade, ktorý berie do úvahy nesmiernu zložitosť biologických a ekologických systémov, sa teraz pokúsime pozrieť na súčasné najväčšie globálne problémy.

2.2 Globálne problémy v prizme Zemského systému

Najvyššia biodiverzita na Zemi bola pravdepodobne na úsvite priemyselného veku. Pred ním totiž človek pretváral našu planétu zväčša iba v subglobálnom meradle, limitovali ho nevýkonné technológie, malá veľkosť ľudskej populácie a jej vtedajšia nízka spotreba. Situácia sa postupne menila ako si človek osvojoval nové nástroje a technológie a ako rástla ľudská populácia a jej priemerná spotreba. Počas zhruba 11 700 rokov trvajúcej geologickej epochy holocénu sa rozvinuli ľudské kultúry a súčasne dramaticky vzrástli vplyvy človeka na prírodu, krajinu a životné prostredie.

Pri hľadaní riešení dnešných výziev sa rozvíjajú koncepcie celostného, systémového prístupu, ktoré umožňujú reflektovať vysokú zložitosť, komplexitu živých systémov. Už Aristoteles totiž vedel, že „*celok je viac ako suma jeho častí*“ a preto jeho poznanie si vyžaduje aj celostné prístupy. Analógiou je vnímanie obrazu maliara, jeho krásu a hodnotu nezistíme iba analýzou použitých farieb a ťahov štetca, ale až pohľadom na celok obrazu. Predpokladom celostného prístupu je vysoká medziodborová spolupráca a integrácia, pričom na pomedzí rozdielnych odborov (napr. matematika, fyzika, kybernetika, biológia, ekológia, spoločenské a ekonomické vedy) vznikajú početné nové vedné disciplíny.

Výskum princípov organizácie a fungovania zložitých ekologických systémov je dôležitý pre ich efektívny manažment, otvorený novým informáciám a rešpektujúci spätné väzby, tiež pre obnovu degradovaných ekosystémov prostredníctvom obnovy ich kľúčových komponentov a procesov. **Systémová perspektíva** sa rozvíja od miestnej po globálnu úroveň, reflektuje teórie zložitosti a nerovnovážnej termodynamiky ekosystémov (KAY 2000; JØRGENSEN & SVIREZHEV 2004), adaptívnych vývojových cyklov (HOLLING 2001, 2004), ekologickej zložitosti a integrity (PROULX 2007; SABO et al. 2011a, 2017) a iné.

2.2.1 Od hypotézy Gaia k Zemskému systému

Vedec a environmentalista James Lovelock a biologička Lynn Margulis v priebehu výskumu NASA venovanému hľadaniu stôp života na Marse sformulovali hypotézu Gaia (z gréc. *Gaia* – starogrécka bohyňa Zeme). Podľa tejto hypotézy Zem v priebehu evolúcie vytvorila globálny ekologický systém, ktorý funguje ako samostatná funkčná entita, ako gigantický autoregulujúci sa kybernetický systém.

Živé organizmy sa na svoje prostredie rozmanitými pôsobmi adaptujú, súčasne ho aktívne ovplyvňujú a menia. Podľa Lovelocka Zemský ekosystém funguje ako obrovský autoregulujúci sa kybernetický systém, ktorý sa prostredníctvom početných a rozmanitých spätných väzieb aktívne podieľa na optimalizácii podmienok potrebných pre život. Ako argumenty uvádza najmä veľké zmeny v chemickom zložení atmosféry za posledné 3,8 miliardy rokov. Napr. v období vzniku života ju charakterizovala vysoká koncentrácia skleníkových plynov, najmä oxidu uhličitého (CO_2) a metánu (CH_4). V tomto období bol tok slnečnej energie k Zemi asi o 25 % nižší a k udržaniu vody v tekutom stave bol nutný veľmi silný skleníkový efekt. Naopak, ako slnko postupne emisie žiarenia zvyšovalo, organizmy výrazne znížili koncentráciu skleníkových plynov v atmosfére a naopak, podstatne zvýšili koncentráciu kyslíka (O_2) nevyhnutného pre existenciu vyšších foriem života.

Relatívne stále chemické zloženie súčasnej atmosféry Zeme, a to aj napriek tomu, že je zmesou vzájomne reaktívnych plynov (napr. kyslíku a metánu), Lovelock vysvetľuje tým, že tieto plyny do nej v obrovských množstvách neustále dodávajú živé organizmy (LOVELOCK 1991, 1993).

Zemský systém

Hlavný prúd svetovej vedy hypotézu Gaia dlhodobo odmietal (aj preto, že bola často nevhodne antropomorfizovaná), avšak zhruba od 80. rokov 20. storočia sa na interdisciplinárnom základe rozvíja **systém vied o Zemskom systéme** (*Earth System Science*) ako o najzložitejšom človeku známom ekologickom systéme (STEFFEN et al. 2007, 2011, 2020). Jeho funkčnosť zabezpečujú interakcie medzi jeho komponentami – najmä litosféry, atmosféry, hydrosféry, pedosféry a biosféry, ale aj noosféry (jeho súčasťou je v stále väčšej miere aj ľudská spoločnosť). Ide o široké spektrum fyzických, chemických a biologických procesov vnútri týchto komponentov (subsystémov) a medzi nimi, ktoré zabezpečujú toky a transformácie energie a hmoty, vrátane biogeochemických cyklov, aj uchovávanie, prenosy, spracovanie a rozvíjanie informácie, čím zabezpečujú podmienky nevyhnutné pre život (STEFFEN et al. 2004).

Zemský systém predstavuje najvyššiu nám známu úroveň organizácie ekologického systému, ktorej vytvorenie a udržiavanie z energetického hľadiska umožňuje predovšetkým tok slnečnej energie, z organizačného hľadiska však predovšetkým zložité siete vnútorných prvkov, procesov a spätných väzieb, ktoré sa podieľajú na autoregulácii tohto mohutného kybernetického systému. *„Zem je systémom, ktorý pomáha riadiť sám život“* (STEFFEN et al. 2004). Ide vôbec o najzložitejší systém v celom človekom poznanom vesmíre. Zložitosť systému totiž nedefinujú iba veľkosti, vzdialenosti a početnosť objektov, ale podstatná je aj variabilita týchto objektov a rozmanitosť interakcií medzi nimi.

Zem je dobrým príkladom **zložitého adaptívneho systému**, v ktorom jednotlivé funkčné vzorce (*patterns*) pozorované na vyšších hierarchických úrovniach, napr. biogeochemické cykly, klimatický systém a iné, sa vynárajú z lokálnych interakcií a adaptácií prvkov na nižších úrovniach organizácie, čo vedie k tomu, že aj systém samotný ma určitú kapacitu adaptácie k zmenám (LEVIN 1998). Preto systém vied o Zemskom systéme zahŕňa fyziku, chémiu, matematiku, informatiku, biológiu, geológiu, klimatológiu, ekológiu, systémovú ekológiu a ďalšie, pričom sa zvyšuje snaha prekonávať hranice jednotlivých disciplín.

V rámci rozvoja týchto vied vzniklo viac významných organizácií a programov, najvýznamnejší bol Medzinárodný program pre geosféru a biosféru (IGBP – *International Geosphere Biosphere Programme*). V roku 2001 bola na konferencii „Challenges of a Changing Earth“ (Výzvy meniacej sa Zeme) za účasti 1 400 rokujúcich zo 105 štátov prijatá tzv. Amsterdamská deklarácia, podľa ktorej výskum Zemského systému a prístup k nemu musí reflektovať výzvy novej epochy, v ktorej žijeme.

Naša zložitá civilizácia závisí od dostupnosti energií a ďalších prírodných zdrojov v zemskej kôre, existenčne však ešte viac od prvkov a zložiek ekosystémov, od ich väzieb a procesov, ktoré generujú ich funkcie v rámci rôznych hierarchií, až po najvyšší, globálny ekosystém Zeme (EHRLICH & EHRLICH 1992; STEFFEN et al. 2004). Tento Zemský systém je globálnym prírodným kapitálom, ktorý generuje toky úžitkov smerom k ľudskej spoločnosti (de GROOT et al. 2002, 2010), teda spektrum a kapacita týchto úžitkov – a tým aj prosperita spoločnosti zásadne **závisí aj od globálneho stavu Zemského systému.**

2.2.2 Narušenie Zemského systému, planetárne hranice

V systémovom pohľade sú dnes osobitne cenné nové štúdie, ktoré hodnotia stav a narušenia život udržiavajúcich systémov Zeme z pohľadu celku Zemského ekologického systému – k takým patria aj už spomínané štúdie o veľkom, exponenciálnom zrýchlení socioekonomického rozvoja a súčasne o analogickom zrýchlení antropogénnych vplyvov na Zemský systém (STEFFEN et al. 2007). Na pochopenie rozsahu zmien, ktoré nás privádzajú k hrane globálneho kolapsu potrebujeme práve systémovú perspektívu nazerania na Zem ako na nesmierne zložitý a súčasne integrovaný živý systém.

Koncepcia planetárnych hraníc

Medzinárodné vedecké tímy pod vedením Johana ROCKSTRÖMA (2009) a Willa STEFFENA (2015a) identifikovali **deväť hlavných kritických procesov, ktoré narúšajú život udržiavajúce subsystémy Zeme**, čím významne ovplyvňujú dynamiku a stabilitu Zemského systému. Autori štúdií navrhli riadiace premenné pre indikáciu narušenia týchto subsystémov: napr. tempo vymierania druhov v prípade ústupu biodiverzity, rast koncentrácie CO_2 v atmosfére v prípade zmeny klímy, množstvo antropogénne viazaného atmosférického dusíka v prípade narušenia cyklu dusíka, podiel straty prirodzených lesných ekosystémov (alebo percento krajiny premenenej na ornú pôdu) v prípade zmien krajinnej pokrývky. Samozrejme, tieto procesy nie sú jediné, ktoré ovplyvňujú Zemský systém, ale sú najvýraznejšie.

Pre tieto procesy autori uvedených štúdií navrhli planetárne hranice (*planetary boundaries*), ktoré definujú bezpečný operačný priestor pre ľudstvo, to znamená pri rešpektovaní ktorých sú ešte existencia a aktivity ľudstva v bezpečí (obr. 2.8). V podstate **ide o pokus o redefiníciu koncepcie udržateľnosti:** udržateľná spoločnosť musí existovať v hraniciach ekologickej únosnosti život udržiavajúcich systémov Zeme. Tieto hranice znamenajú prahy resp. body zlomu v tom zmysle, že za nimi síce ešte nenastáva zrútenie Zemského systému, ale označujú vstup do rizikovej oblasti (tzv. zóny neistoty), ktorá znamená, že čím viac sú planetárne hranice „bezpečia civilizácie, udržateľnosti jej aktivít" prekročené, tým vyššie je riziko náhlej a pre ľudskú spoločnosť nepriaznivej zmeny Zemského systému. Zemskú dynamiku totiž charakterizujú kritické prahy a náhle zmeny, pričom intenzita a rozsah súčasných ľudských aktivít môžu spustiť nenávratné zmeny, s katastrofickými dôsledkami pre civilizáciu.

Pri analýze týchto procesov resp. subsystémov Zemského systému zistili v niekoľkých prípadoch ich vysoké narušenie, prekročenie „prahov bezpečia", bezprecedentné v celej ľudskej histórii. Za kľúčové nepriaznivé globálne procesy považujú predovšetkým súčasnú klimatickú zmenu a zníženie integrity biosféry (správnejšie zníženie integrity živej zložky Zemského systému). Každý z nich má totiž potenciál pri prekročení ich planetárnych hraníc (rozumej ekologických limitov) posunúť celý Zemský systém do nového stavu, ktorý nemusí byť priaznivý pre ľudskú spoločnosť (STEFFEN et al. 2015a).

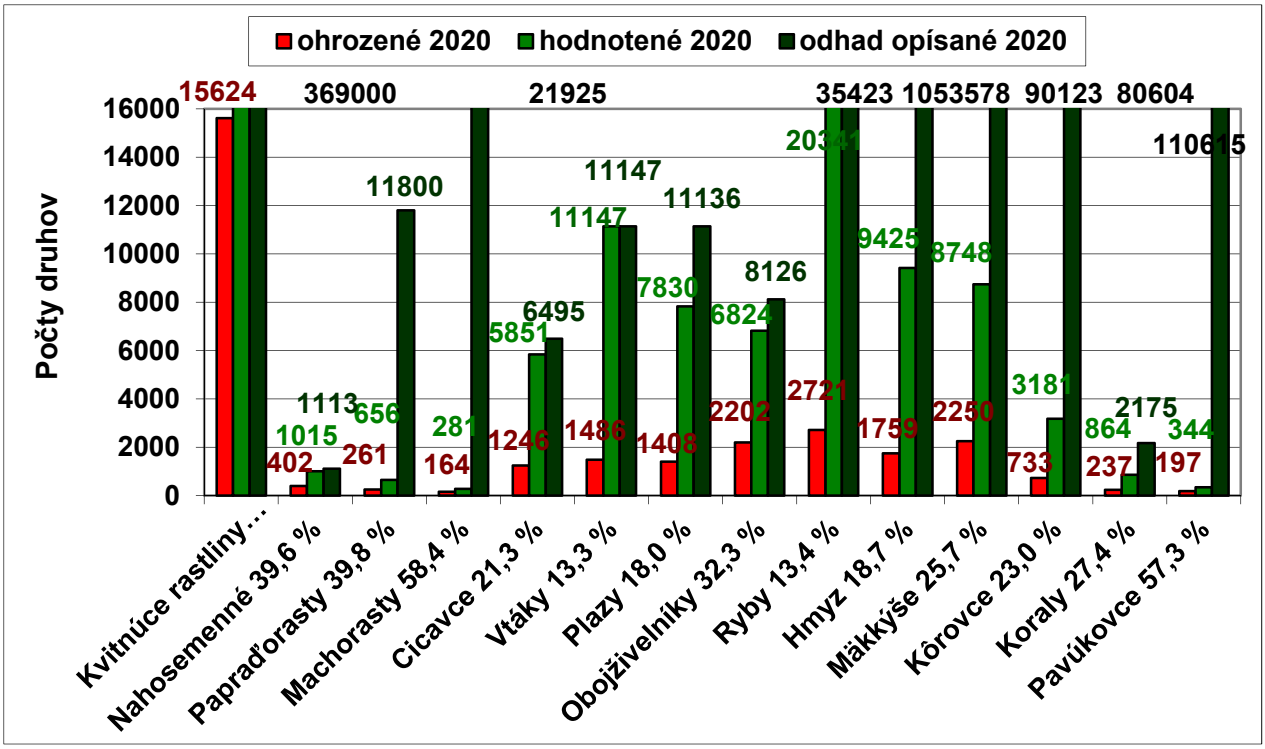
Zmeny integrity biosféry (Zemského systému)

Tento kľúčový planetárny proces je podľa (STEFFEN et al. 2015a) dôsledkom **úbytku *„geneticky jedinečného materiálu**, ktorý definitívne určuje potenciál života vyvájať sa dalej v koevolúcii s abiotickým prostredím Zemského systému*". Vyjadrením tohto potenciálu je **biodiverzita – biologická variabilita** na rôznych úrovniach organizácie živých systémov, predovšetkým medzidruhová, genetická (v rámci populácií) a ekosystémová. Vyššia biodiverzita je ako poistka, ktorá zvyšuje šance organizmov a ekosystémov adaptovať sa a pretrvávať aj pri výrazných alebo náhlych zmenách abiotického prostredia.

Za prvú predbežnú kontrolnú premennú si autori štúdií o planetárnych hraniciach zvolili tempo **vymierania druhov**. Priro a vyjadruje schopnosť a kapacitu živých zložiek Zemského systému existovať v dynamicky sa meniacom prostredí, adaptovať sa na zmeny jeho abiotických zložiek, ako aj na ne aktívne pôsobiť tohto systému masodzené tempo vymierania určené podľa fosílnych nálezov je 1 – 10 E/MSY (jedna až desať extinkcií na milión druhov-rokov). Autori štúdií o planetárnych hraniciach určili ako prah bezpečia hodnotu 10 E/MSY (a ako vonkajšiu hranicu prahu neistoty hodnotu 100 E/MSY). Problém je, že **súčasné**

tempo vymierania druhov podľa odhadov 10 až 100 násobne prevyšuje prirodzené tempo (t.j. je v rozsahu 100 – 1000 E/MSY, MACE et al. 2005; STEFFEN et al. 2015a; IPBES 2019). Podstatná časť druhov vymiera v ekosystémoch tropického pásma, ešte skôr ako ich vedci stihnú objaviť a opísať.

Závažnosť situácie indikujú aj dlhodobé trendy ohrozenia druhov, preukazné v prípade dobre poznaných a úplne alebo takmer úplne hodnotených taxonomických skupín. Podľa aktuálneho **Červeného zoznamu ohrozených druhov** z dielne Medzinárodného zväzu pre ochranu prírody (IUCN 2020) sú nimi nahosemenné rastliny (podľa dolného odhadu IUCN je to 40 % ohrozených druhov z počtu hodnotených druhov), cicavce (dolný odhad 22 %, horný odhad 37 %), vtáky (14 %) a obojživelníky (33 % až 53 %) – obr. 2.7. Z ekologického pohľadu je tento podiel ohrozených druhov nebezpečne vysoký, navyše vyhynutie kľúčových druhov v ekosystémoch môže viesť ku kaskáde strát mnohých ďalších druhov (PRIMACK et al. 2011). Na rizikový vývoj upozorňuje napr. aj vysoký podiel ohrozených druhov obojživelníkov, ktoré patria k dobrým bioindikátorom kvality prostredia.



Obr. 2.7. Počty globálne ohrozených, hodnotených a opísaných druhov vo vybraných taxonomických skupinách v roku 2020. Ohrozenie je preukazné v prípade skupín hodnotených vo veľkom rozsahu alebo úplne. V roku 2017 bolo ohrozených 402 druhov nahosemenných rastlín (39,6 % z hodnotených druhov), 1 196 druhov cicavcov (21,2 %), 1 460 druhov vtákov (13,1 %) a 2 100 druhov obojživelníkov (31,9 %).
Graf: Peter Sabo, *Zdroj údajov:* IUCN 2020: IUCN RedList of Threatened Species. Version 2020.1.

Podľa poslednej správy Medzivládnej platformy pre biodiverzitu a ekosystémové služby (IPBES, *The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*) je v súčasnosti ohrozených až 25 % druhov v hodnotených skupinách rastlín a živočíchov, čo ich viedlo k odhadu, že globálne je ohrozených približne až jeden milión druhov (IPBES 2019).

Druhou riadiacou premennou, ktorú autori koncepcie planetárnych hraníc zvolili, je úbytok komponentov biodiverzity na úrovni biómov. Do lesných ekosystémov ho premietli v podobe indexu intaktnosti biodiverzity (BII, *Biodiversity intactness index*). V prípade tropických pralesov a boreálnych lesov by mal byť prah bezpečia 90 % intaktnosť, zóna neistoty má rozsah 30 – 90 % intaktnosti. Tento index je zatiaľ iba na úrovni odhadov. Problém však je, že človekom výraznejšie nepoznamenaných ostalo už iba 25 % rozlohy všetkej pevniny (IPBES 2019). Podľa novšej štúdie NEWBOLDA et al. (2016) je v súčasnosti navrhovaná planetárna hranica intaktnosti biodiverzity prekročená u terestrických ekosystémov v priemere na 58,1 % rozlohy pevniny.

Iné proxy indikátory úbytku biodiverzity

Index živej planéty z dielne Svetového fondu na ochranu prírody (*World Wide Fund for Nature*) indikuje pokles veľkosti populácií pre človeka zaujímavých druhov (napr. ohrozené, hospodársky zaujímavé) na báze sledovania 16 704 populácií zo 4 005 druhov stavovcov. V období 1970 – 2014 tento index v globálnom priemere klesol o 60 %, v neotropickej oblasti až o 89 %. Tento index je však kritizovaný za to, že výber druhov a populácií nie je náhodný, ale účelový a index považuje aj prirodzené oscilácie populácií za ich pokles.

Aj v Európe je situácia nepriaznivá: podľa analýzy monitoringu pulácií 148 bežných vtáčích druhov, až u 57 z nich (39 %) došlo v období 1980 – 2010 k ich poklesu v 25 štátoch. V prípade sledovaných 37 bežných a donedávna hojných druhov vtákov viazaných na poľnohospodársku krajinu došlo k v tomto období k poklesu ich populácií až o neuveriteľných 52 %, čo predstavuje stratu 300 miliónov vtákov za 30 rokov.

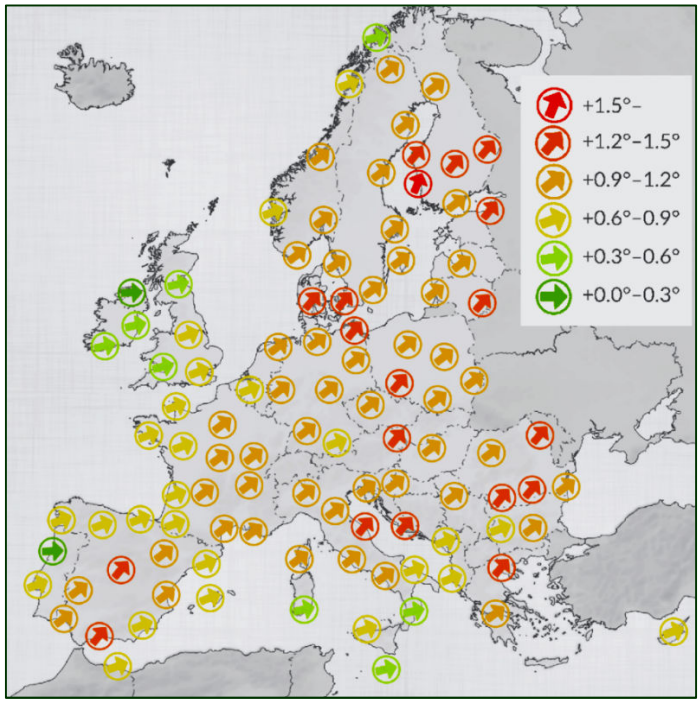
Zdroj: KLVAŇOVÁ et al. 2008; VEEN et al. 2009; BIRDLIFE INTERNATIONAL 2013; INGER et al. 2015; WWF 2018

Systematický a čitateľsky prístupný prehľad súčasného ohrozenia biodiverzity Zeme, Európy a Slovenska a dostupné riešenia uvádzajú napr. štúdie PRIMACK et al. (2011), SABO et al. (2011b) aj početné správy inštitúcií OSN a EÚ (napr. CBD 2014; EEA 2019; IPBES 2019; UNEP 2019). Strata biodiverzity má aj vážne socioekonomické dôsledky, globálne sa totiž znižuje schopnosť, kapacita ekosystémov podporovať existenciu a prosperitu ľudskej populácie (napr. MEA 2005; CARDINALE et al. 2012).

Zmena klímy

Druhým kľúčovým procesom v Zemskom systéme, ktorý prekročil planetárnu hranicu je zmena klímy. Podľa správy Medzivládneho panelu pre zmenu klímy rozdiel priemerov globálnych teplôt zemského povrchu v obdobiach 1850 – 1900 a 2006 – 2015 je 0,86 °C, v roku 2018 to bolo až 1 °C a do konca storočia má teplota rásť ešte výraznejšie (IPCC 2014, 2018). **Rýchlosť globálneho otepľovania** predstavuje 0,2 °C za desaťročie (Hansen in UNEP 2012) a stále rastie.

V Parížskej dohode, prijatej v decembri 2015 účastníkmi Rámcového dohovoru OSN o zmene klímy sa štáty zaviazali udržať zvýšenie globálnej priemernej teploty 2 °C a vynaložiť úsilie obmedziť toto zvýšenie na 1,5 °C (v porovnaní s predindustriálnym obdobím (ENVIROPORTÁL 2019). Ak sa však zásadne nezmenia socio-ekonomické trendy, oteplenie o 1,5 °C môže nastať už v období 2032 - 2050.



Obr. 2.8. Zmena priemernej ročnej teploty v mestách Európy v období 1900 – 2017. *Zdroj:* Leonard Wallentin /Journalism++/EDJNet, European Data Journalism Networok, Creative Commons BY 4.0. https://en.wikipedia.org/wiki/Climate_change_in_Europe#/media/File:Increase_of_average_yearly_temperature_in_Europe_(1900-2017).png

Teplota európskeho kontinentu rástla rýchlejšie ako celosvetový priemer, v roku 2016 bola o 1,5 °C vyššia ako v predindustriálnom období (obr. 2.8) – kontinenty sa totiž otepľujú rýchlejšie ako oceány a toto otepľovanie je tiež silnejšie smerom do vnútrozemia a smerom od rovníka k pólom (EEA 2012, 2017). Výraznejšie sa otepľuje aj vnútrozemie kontinentov: Na Slovensku bol v období 1881 – 2016 zaznamenaný trend rastu priemernej ročnej teploty ovzdušia až o 1,73 °C a ročné úhrny atmosférických zrážok poklesli o 0,5 %, na juhu Slovenska až o 10 % (LIESKOVSKÁ & Némethová 2017). Rozsah a vplyvy zmeny klímy preto budú na našom území pravdepodobne oveľa výraznejšie ako bude európsky priemer (MŽP SR 2018).

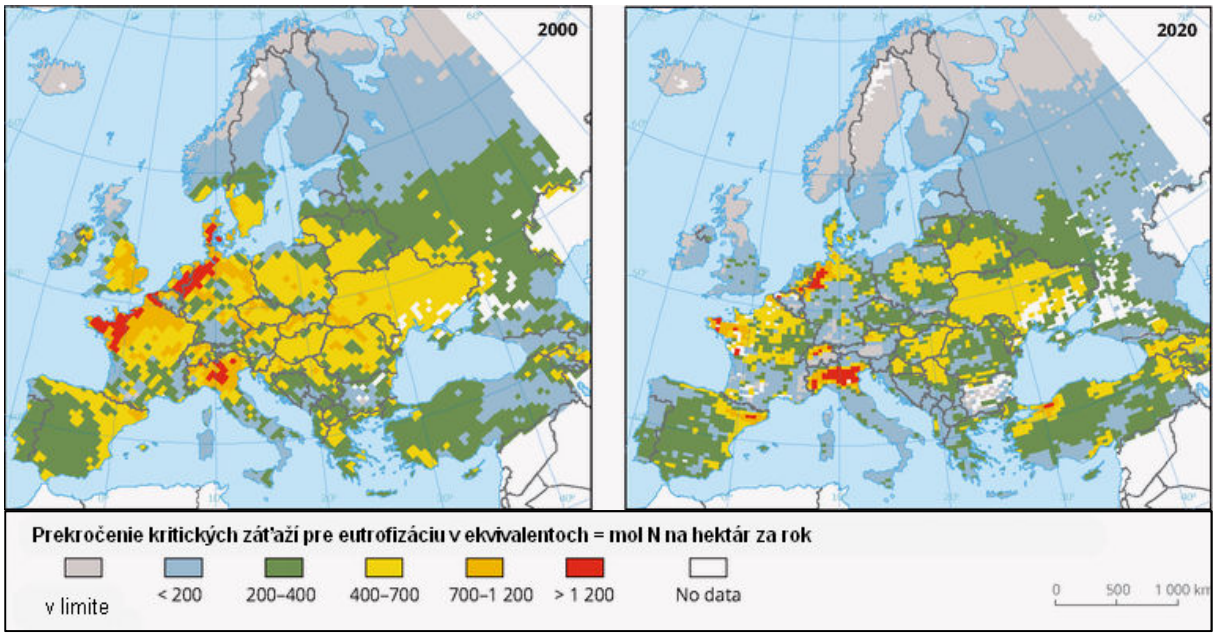
ROCKSTRÖM et al. (2009) navrhli ako prvú kontrolnú premennú koncentráciu oxidu uhličitého (CO_2) v atmosfére a ako prah bezpečia navrhli koncentráciu CO_2 v atmosfére 350 ppm. Zóna neistoty má rozsah 350 – 550 ppm CO_2 v atmosfére. V septembri 2019 však táto koncentrácia dosiahla 408,55 ppm (CO_2Earth 2019) čo je oproti predindustriálnemu obdobiu (280 ppm) nárast o 45,9 %. Pri stanovení tejto hranice ROCKSTRÖM et al. vychádzali z toho, že pri zvýšení koncentrácie CO_2 na úroveň 450 ppm už nebude na zemskom povrchu žiadna ľadová pokrývka a nie sú vylúčené náhle zmeny klímy.

Druhou riadiacou premennou, ktorá má ROCKSTRÖMA et al. (2009) indikovať zmenu klímy je riadiačné zosilnenie, spôsobené rastom koncentrácií skleníkových plynov, ale tiež zmenou krajinnej pokrývky kontinentov. Ako planetárnu hranicu bezpečia autori štúdie o planetárnych hraniciach navrhli hodnotu tohto zosilnenia oproti predindustriálnej ére rovnú 1 $W.m^{-2}$ a zónu neistoty v rozmedzí 1 – 1,5 $W.m^{-2}$. Odhady reálneho riadiačného zosilnenia v roku 2011 sa pohybovali od 1,1 až po 3,3 $W.m^{-2}$.

Zmena klímy pôsobí synergicky s úbytkom biodiverzity a rozsiahlou zmenou krajinnej štruktúry obývaných kontinentov, narušením vodného cyklu a pod., ktoré klimatickú zmenu zosilňujú. Vplyv zmeny klímy na biodiverzitu bude prevažne nepriaznivý. Očakáva sa posun vegetačných pásiem o 200 až 1200 km smerom od rovníka k pólom a posun vegetačných stupňov o desiatky (až stovky) metrov do vyššej nadmorskej výšky, pričom zmeny budú rásť smerom k pólom a vyšším vegetačným stupňom (IPCC 2007, 2013). Zmeny ekologických podmienok už dnes vedú k zmenám a posúvaniu areálov druhov (príchod nových druhov entmológovia zistili aj u nás – napr. čmeliakov, SMETANA & ŠÍMA 2005; ŠÍMA & SMETANA 2012). Dôsledkom budú zmeny druhového zloženia spoločenstiev a štruktúry a funkcií ekosystémov (niektoré druhy vyhynú, niektoré sa adaptujú), posuny fenologických fáz s rizikom ich desynchronizácie a vzniku trofických nezhôd (v rámci vzťahov herbivor – rastlina, predátor – korisť) alebo narušenia vzťahov medzi kvitnúcimi rastlinami a ich opeľovačmi a iné zmeny (IPBES 2019). To ohrozí mnohé už dnes ohrozené druhy rastlín a živočíchov, najmä endemity. V dôsledku častých vĺn horúčav a dlhotrvajúceho sucha už dnes lesy viac ohrozujú požiare, víchrice, veterné polomy a populačné gradácie podkôrneho, listožravého a iného hmyzu. Príchod nových druhov burín a hospodárskych škodcov môže nepriaznivo ovplyvniť poľnohospodársku produkciu, atď.

Biogeochemické cykly

Treťou skupinou procesov, ktoré významne prekročili planetárne hranice bezpečia (a v tomto prípade prekročili aj zónu neistoty) sú narušenia biogeochemických cyklov. Pri vysokom prísune živín na polia (najmä vo forme minerálnych hnojív) rastliny všetok dusík prítomný v pôde nevyužijú a jeho splachy



Obr. 2.9. Expozícia ekosystémov voči eutrofizácii v roku 2000 a v roku 2020. Priemerné akumulované prekročenie kritických záťaží pre eutrofizáciu. *Zdroj:* European Environment Agency 2017.

z polí zosilňujú eutrofizáciu stojatých a pomaly tečúcich vôd, aj pobrežných oblastí morí. V moriach už v roku 2008 existovalo 400 zón s nedostatkom kyslíka na rozlohe 245 000 km^2 (IPBES 2019).

Autori štúdií o planetárnych hraniciach ich preto definovali i pre toky dusíka (N) a fosforu (P) v biosfére (obr. 2.9). Pre fixáciu dusíka priemyselnými procesmi a v poľnohospodárstve navrhli hranicu bezpečia 62 Tg ročne (STEFFEN et al. 2015a), ktorá by mala sladkovodné ekosystémy uchrániť pred silnou eutrofizáciou. Súčasná antropogénna fixácia dusíka dosahuje 116 – 127 Tg N ročne (UNEP 2019), čo je zhruba dvojnásobok navrhnutej hranice.

V prípade fosforu navrhli ako hranicu bezpečia prísun 11 Tg fosforu ročne riekami do oceánov, čo ich má uchrániť pred eutrofizáciou a vznikom mŕtvych oblastí, ktoré postrádajú dostatok kyslíka pre život morských organizmov). (Cykly dusíka a fosforu podrobne približujeme v kapitole 3.2. venovanej piatim najvýznamnejším biogeochemickým cyklom.)

Rozsiahla zmena krajinnej pokrývky

Zachovanie integrity Zemského systému si vyžaduje uchovať aspoň do určitej miery aj pôvodnú krajinnú pokrývku kontinentov. ROCKSTRÖM et al. (2009) pôvodne navrhli za riadiacu premennú podiel krajiny premenenej na ornú pôdu, s navrhnutým prahom bezpečia 15 % globálneho podielu ornej pôdy. V súčasnosti je už na ornú pôdu premenených 12 % povrchu kontinentov a spolu s lúkami a pasienkami pre chov dobytka je to až 1/3 ich povrchu (IPBES 2019).

Berúc do úvahy zmenu klímy, STEFFEN et al. (2015a) ako novú riadiacu premennú navrhli podiel zachovalej lesnej pokrývky troch hlavných lesných biómov – tropických pralesov, listnatých opadavých lesov a boreálnych lesov, keďže lesy sú súčasťou významných spätných väzieb v klimatickom systéme Zeme, ovplyvňujú albedo zemského povrchu a prostredníctvom absorpcie CO_2 aj skleníkový efekt. Prah bezpečia bol v prípade tropických pralesov a boreálnych lesov stanovený na 85 % zachovalých lesov (oproti pôvodnej lesnej pokrývke), v prípade listnatých opadavých lesov mierneho pásma bol prah stanovený na 50 % (STEFFEN et al. 2015a). V prípade biómov tropických pralesov aj listnatých opadavých lesov je prah bezpečia prekročený. Veď iba v období rokov 1980 – 2000 bolo odlesnených zhruba 100 miliónov ha tropických pralesov (IPBES 2019), čo je viac ako 20-násobná rozloha Slovenska. Boreálne lesy sú zachovalejšie, ale čelia rastúcej ťažbe dreva, najmä na Sibíri a v Kanade, devastácii v dôsledku ťažby fosílnych palív (najmä ropy a zemného plynu) a tiež rozsiahlym požiarom.

Rozsiahlu zmenu krajinnej pokrývky charakterizuje aj zmena pôvodnej vegetácie. Rozloha kontinentov je zhruba 140 miliónov km^2, z toho obývateľná plocha predstavuje 83,25 %. Z tejto plochy už na prelome milénia iba približne 27 % ostalo človekom relatívne nenarušených, so zachovanou primárnou vegetáciou. Ďalších 36,7 % predstavujú narušené plochy, so zmenenou, sekundárnou vegetáciou a zostávajúcich 36,3 % sú výrazne zmenené plochy, kde bola pôvodná vegetácia nahradená ornou pôdou alebo pôdy boli degradované, krajina zastavaná alebo podlieha dezertifikácii (HARRIS 2004).

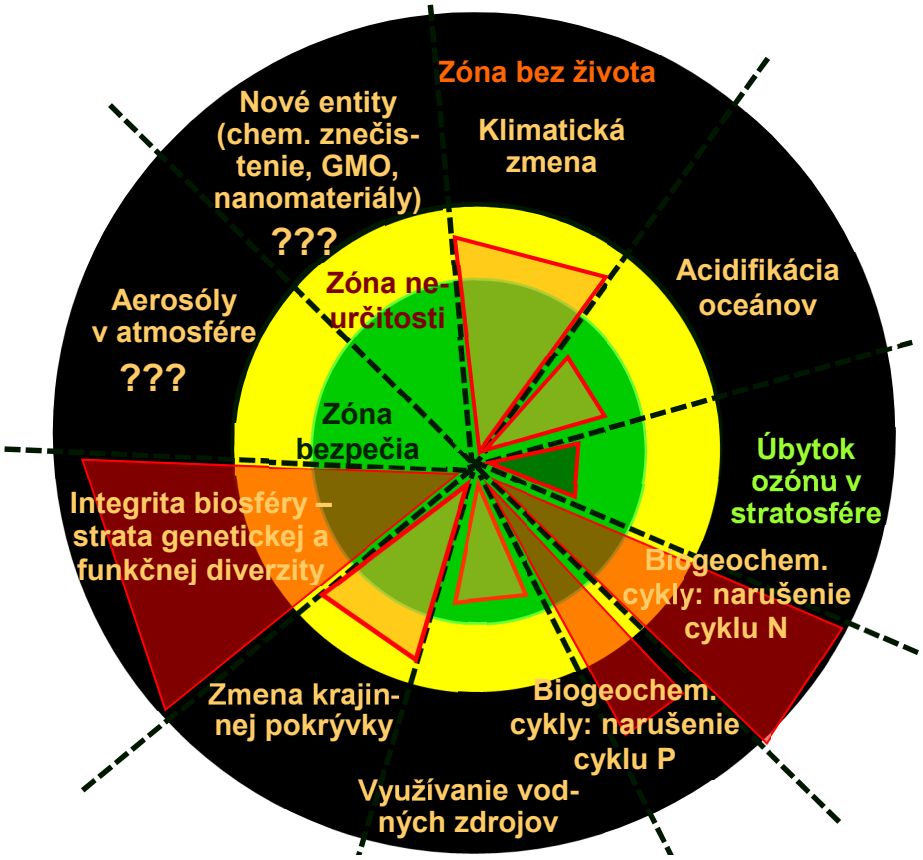
Ďalšie planetárne hranice kľúčových procesov

V prípade dvoch ďalších kľúčových procesov (narušení pôvodných systémov) sa postupne približujeme k ich planetárnym hraniciam „bezpečia ľudských aktivít“ (STEFFEN et al. 2015a, obr. 2.10):

Acidifikácia oceánov – oproti predindustriálnej dobe ich pH kleslo z 8,2 na 8,1, čo znamená cca 30 %-né zvýšenie kyslosti (zvýšenie koncentrácie voľných vodíkových iónov H^+) a toto okysľovanie prebieha asi 100 x rýchlejšie ako za posledných 55 miliónov rokov (EEA 2017). Acidifikácia oceánov znižuje nasýtenosť morskej vody uhličitanom vápenatým ($CaCO_3$), ktorý je dôležitý pre tvorbu aragonitu a ten je dôležitou spevňujúcou súčasťou tiel mnohých morských organizmov, od fytoplanktónu až po početné druhy živočíchov s vonkajšími aragonitovými stránkami (najmä koraly a makkýše). Do roku 2100 sa prognózuje zníženie priemernej hodnoty pH oceánov na hodnotu 8,05 príp. až na 7,75 (EEA 2017). STEFFEN et al. (2015) navrhli ako planetárny prah udržať najmenej 80 % saturáciu morskej vody aragonitom v porovnaní s predindustriálnou érou (súčasná saturácia je už iba na úrovni 84 %). Pri silnej acidifikácii nebude možná tvorba

aragonitových schránok, príp. by sa mohli rozpúšťať, čo by znamenalo obrovskú stratu morskej biodiverzity a praktické odstavenie morskej biologickej pumpy uhlíka (viac o cykle uhlíka v kapitole 3.2).

- **Rastúca spotreba vody** – za posledných 50 rokov vzrástla zhruba 3 násobne (UNEP 2012), najviac vody spotrebúva poľnohospodárstvo, zhruba 70% globálnej spotreby, najmä na závlahy. ROCKSTRÖM et al. (2009) navrhli ako prah bezpečia spotrebu 4 000 km^3 povrchovej vody ročne, v súčasnosti je to 2 600 km^3 ročne a aj preto až 25 % veľkých riek má problém aspoň po časť roku dotiecť až k moru. Steffen et al. (2015) premietli požiadavku ochrany vody na regionálne povodia, v ktorých navrhujú zachovať minimálne 25 až 80 % prietoku, v závislosti od režimu a charakteru toku. S nedostatkom vody sa dnes potýka až 40 % obyvateľov Zeme a v dôsledku zmeny klímy, odlesňovania a úbytku kapacity pôdy v poľnohospodárskej krajine zadržiavať vodu sa táto situácia bude zhoršovať (WWAP 2015). Rozsiahle narušenie globálneho vodného cyklu (aj v dôsledku veľkého úbytku lesov) tiež nepriaznivo vplýva na klimatický systém, s ktorým je vodný cyklus previazaný (UNEP 2019).



Obr. 2.10. Koncepcia planetárnych hraníc (ide o pomyselný priestor, v ktorom ľudské aktivity neprekročili globálne prahy ekologickej únosnosti, na obrázku je vyznačený zelenou farbou). Hranice tohto bezpečného priestoru sú už prekročené v prípade štyroch život udržujúcich procesov, k prahom nevratných zmien sa blížia narušenia ďalších dvoch systémov, u dvoch je narušenie výrazné, ale ich ekologické prahy sú neznáme. Žltá čať kruhu je zónou neurčitosti – pri pohybe smerom k vonkajšiemu kruhu rastie riziko prechodu Zemského systému do stavu nepriaznivého pre ľudskú spoločnosť. *Upravené podľa:* ROCKSTRÖM et al. 2009; STEFFEN et al. 2015a.

U ďalších dvoch procesov ani posledná štúdi o planetárnych hraniciach (STEFFEN et al. 2015a) ešte nestanovila prahy ich bezpečia, nakoľko v dôsledku kumulatívnych aj synergických účinkov znečisťovania prostredia je ich stanovenie mimoriadne obtiažne:

- **Nárast záťaže ovzdušia aerosólmi** – polietavý prach a iné nečistoty v ovzduší; nebezpečné sú najmä veľmi malé častice označované PM-10 a PM-2,5 (priemer menší ako 10 / 2,5 μm), ako aj ultrajemné častice (priemer menší ako 0,1 μm). Znečistenie ovzdušia aerosólmi je zodpovedné za 6 až 7 miliónov predčasných úmrtí ročne (UNEP 2019). Kým svetlé aerosóly slnečné žiarenie odrážajú, tmavé aerosóly ho pohlcujú, čím ovplyvňujú atmosférickú cirkuláciu. Napr. svetlé aerosóly nad juhovýchodnou Áziou

znižujú tok slnečného žiarenia k povrchu o 10 až 15 %, čo vedie k oslabovaniu monzúnov a úbytku zrážok, kým tmavé aerosóly na úpätí Himalájí vedú k ich zosilneniu (ROCKSTRÖM et al. 2009).

- **Nové, neobvyklé entity** – nové substancie, ich nové formy, geneticky modifikované organizmy alebo organizmy vytvorené procesmi syntetickej biológie, ktoré môžu potenciálne nepriaznivo vplývať na iné organizmy a ekosystémy. Najvýraznejšie je chemické znečistenie, zhruba 100 tisíc syntetických chemikálií je dnes súčasťou medzinárodného obchodu, keďže sa bežne využívajú, pritom u väčšiny z nich sú vplyvy na ľudské zdravie a životné prostredie neznáme (UNEP 2019). Mnohé z nich sú karcinogénne, teratogénne a mutagénne, avšak ich planetárna hranica je zatiaľ kvôli jej obtiažnosti (podobne ako v prípade aerosólov) neznáma. Nové zdravotné a environmentálne riziká predstavujú nanomateriály, syntetické látky tvorené submikroskopickými časticami o veľkosti 1 až 100 nm, ktoré sú už súčasťou mnohých komerčných produktov. Nanočastice môžu interagovať s mikroorganizmami, s organickými molekulami a bunkami, čo je možné využiť napr. na neutralizáciu znečisťujúcich látok v prostredí, súčasne však predstavujú nové zdravotné a environmentálne riziká.
- Posledný proces, **poškodzovanie stratosférickej ozónovej vrstvy**, ktoré mohlo viesť ku vysokému ohrozeniu života, je dnes už príbehom s očakávaným dobrým koncom. Táto vrstva bola v dôsledku produkcie ozón ničiacich substancií najviac zoslabená v 90. rokoch (cca o 5 %). Tieto substancie majú dlhú životnosť v atmosfére a preto sa dostávajú až do stratosféry, kde sa z nich uvoľnujú reaktívne plyny (Cl, Br, ClO, BrO), ktoré rozkladajú ozón. Po prijatí účinných regulácií a praktického vylúčenia týchto látok (na základe Montrealského protokolu a jeho neskorších dodatkov) sa táto vrstva pomaly zotavuje. Periodicky sa síce ešte v jesenných mesiacoch objavuje ozónová diera nad Antarktídou, avšak už po viac rokov nerastie (najväčšia bola v roku 2006). Do polovice 21. storočia sa očakáva úplné zotavenie ozónovej vrstvy. Jej príbeh je ilustráciou a nádejou, že ak existuje politická vôľa, aj obrovské globálne problémy je možné úspešne riešiť. (SALAWITCH et al. 2019).

Koncepcia planetárnych hraníc v systémovom pohľade upozorňuje na to, že súčasná degradácia životného prostredia je širokospektrálna a táto skutočnosť sa nedá zredukovať na jeden problém, napr. iba na zmenu klímy, a následne na jeho izolované riešenie. Napr. podľa štúdie KOMATSU et al. (2019) dôsledky vplyvov globálnych zmien na rastlinné spoločenstvá sa znásobujú s pribúdajúcim časom a s rastom počtu nepriaznivých procesov.

Navyše vyššie načrtnuté nepriaznivé procesy nevystupujú izolovane, ale v dôsledku zložitého pradiva vzťahov sa môžu vzájomne posilňovať. Napr. zmena klímy vedie v dôsledku veľkého poklesu zrážok v niektorých oblastiach k dezertifikácii. Dezertifikácia znamená úbytok vegetačnej pokrývky, ktorá absorbuje skleníkový plyn CO_2 a navyše sa daný povrch v dôsledku úbytku transpirácie vody rastlinami výrazne prehrieva, čo oboje spätne posilňuje zmenu klímy.

2.2.3. Antropocén a riziko náhlej zmeny Zemského systému

Znakom zložitých systémov je aj nelinearita ich správania, ktorá výrazne sťažuje predikcie ich správania. V tomto zmysle nám aj koncepcia planetárnych hraníc, vrátane návrhu prahov pod ktorými sú ešte naše aktivity ekologicky únosné, pripomína, že **žijeme na dynamickej Zemi**, ktorej nelineárne správanie ilustrujú aj rozsiahle náhle zmeny v minulosti. Tieto zmeny nastávajú po prekročení určitých prahov (*thresholds*) hodnôt premenných riadiacich život udržiavajúce systémy Zeme.

Analýza paleoekologických záznamov z dávnejšej histórie Zeme preukázala, že takéto zmeny naozaj nastávajú. Príkladom je rýchla premena Sahary, ktorá na začiatku holocénu ešte pripomínala africkú savanu, na púšť pred približne 6 000 rokmi. Prvotnou príčinou bola malá zmena distribúcie slnečného žiarenia na zemskom povrchu (STEFFEN et al. 2004), ktorá oslabila západoafrický monzún prinášajúci vlahu, s vysušovaním krajiny spojené kladné spätné väzby spojené, a pravdepodobne k tomu prispeli aj aktivity vtedajších ľudských spoločností v tomto území. To, že takúto rýchlu zmenu môže vyvolať aj malá zmena niektorého z faktorov, ktoré ovplyvňujú Zemský systém, je varujúce.

Nové geologické obdobie – Antropocén

Dospeli sme teda do bodu, kedy sa naša civilizácia stala rozhodujúcou geologickou silou, ktorá mení povrch planéty, zanechávajúc na tvári Zeme hlboké a dlhodobé stopy. To viedlo niektorých vedcov, vrátane nositeľa Nobelovej ceny za chémiu Paula Crutzena, k návrhu vyčleniť **nové geologické obdobie – Antropocén,** čo má vyjadriť dominanciu človeka nad prírodnými silami pri formovaní súčasnej aj budúcej tváre Zeme (ZALASIEWICZ et al. 2010). Poznanie, že napriek našej hlbokej závislosti na prírodných systémoch ich už desaťročia deštruujeme v planetárnom meradle (DIAZ et al. 2019) stavia pred nás nevyhnutnosť zabrániť ďalšej deteriorizácii život udržiavajúcich systémov a Zemského systému.

Užitočným sa javí členiť Antropocén na niekoľko fáz, ktoré sa odlišujú veľkosťou vplyvov človeka na životné prostredie. Podľa STEFFENA et al. (2007) 1. fáza začína s priemyselnou revolúciou, 2. fáza s Veľkým zrýchlením a 3. ľudstvu ešte známou fázou môže byť zásadná zmena nášho postoja k Zemi a tým aj zmena súčasného socioekonomického systému založeného na rastúcej produkcii a spotrebe. V tejto súvislosti si treba pripomenúť, že vplyvy človeka rastú najmä od roku 1950. Veľké zrýchlenie znamená, že v tomto období sa prudký exponenciálny socioekonomický rozvoj premieta aj do rastúcej deštrukcie ekosystémov Zeme, pretože prudko narástli požiadavky na produkciu potravín, čerpanie zdrojov a energie, čo v konečnom dôsledku znamená prudký nárast tlakov na Zemský systém (STEFFEN et al. 2011, 2015b). Antropogénnymi stopami v stratigrafickom zázname v zemskej kôre sú aj usadeniny rádioaktívnych prvkov, ktoré pochádzajú z pokusných atómových výbuchov z obdobia rokov 1945 – 1963.

Podstatnejšie ako vymedziť fázy Antropocénu je však poučiť sa z rozpadu civilizácií, ktoré nedokázali včas vnímať signály devastácie ich prostredia. Keďže podľa viacerých štúdií sa v najbližších desaťročiach predpokladá ešte ďalší nárast nepriamych hybných síl a zvýšenie tlakov na ekosystémy (UNEP 2019, IPBES 2019), mali by sme urobiť všetko preto, aby Antropocén nebol poslednou historickou epochou existencie ľudskej civilizácie. To si však vyžaduje zásadnú transformáciu spoločnosti (DÍAZ et al. 2019).

Riziko náhlej zmeny Zemského systému

Z pohľadu teórie systémov vyššie načrtnuté narušenia kľúčových globálnych procesov vyvolávajú také zmeny v Zemskom systéme, ktoré predstavujú **riziko jeho náhlych a nevratných zmien** spojených s prechodom do pre nás nepriaznivého stavu: *„Antropogénne tlaky na systém Zeme dosiahli rozmery, kedy už nemožno vylúčiť náhle globálne environmentálne zmeny... Prekročenie jednej alebo viacerých planetárnych hraníc môže byť zhubné alebo katastrofické v dôsledku prekročenia prahu, za ktorým sa spustia nelineárne, náhle environmentálne zmeny kontinentálneho až planetárneho rozsahu.*“ (ROCKSTRÖM et al. 2009).

BARNOSKY et al. (2012) v tejto súvislosti poukazujú na nevyhnutnosť zlepšenia biologických a ekologických prognóz ohľadne týchto kritických prechodov, čo si vyžaduje porozumieť tomu ako globálne trendy spôsobujú lokálne zmeny. Globálny prechod do iného stavu môže byť spôsobený prekročením prahu nevratnej zmeny alebo synergiou viacerých globálnych nepriaznivých procesov, ktorých vplyvy narastajú postupne. Uvedení autori ako príklady takýchto nevratných zmien uvádzajú posledný prechod z doby ľadovej do interglaciálu, aj päť veľkých masových vymieraní druhov v geologickej histórii Zeme (zhruba pred 443 miliónmi, 359 miliónmi, 251 miliónmi, 200 miliónmi a 65 miliónmi rokov).

Môžeme zhrnúť, že v súvislosti s prekračovaním planetárnych ekologických limitov výrazne rastie **riziko globálneho ekologického, sociálneho a tým aj civilizačného kolapsu** (DIAMOND 2008). Toto riziko najviac ohrozuje práve euro-americkú civilizáciu, pretože práve ona je na vrchole pyramídy spotreby energie a prírodných zdrojov (NOVÁČEK 2011). Treba povedať, že nie je ohrozený život na Zemi ako taký – život je tak úžasná sila, že po každom masovom vymieraní druhov v geologickej histórii Zeme sa vždy znovu rozvinul do ešte väčšej šírky, rozmanitosti a dokonalosti. V hre je však budúcnosť ľudskej civilizácie.

Historici opísali rozpad viacerých veľkých civilizácií, ako bola napr. harappská v údolí Indu, mezopotámska v povodiach Eufratu a Tigrisu, egyptská v údolí Nílu (ktorú porazili až obrovské dlhotrvajúce suchá), alebo mayská civilizácia v strednej Amerike, olmécka na severe Mexika, chacoánska na dnes vyprahnutej náhornej plošine na juhozápade Nového Mexika v USA a iné (TAINTER 2009).

Známy je príklad rozpadu stredovekej ostrovnej civilizácie Veľkonočného ostrova: devastácia krehkého ostrovného ekosystému, predovšetkým odlesňovanie, viedla k rozsiahlej erózii pôdy a k úbytku biodiverzity. Strata úrodnej pôdy, v lesoch hniezdiaceho vtáctva a lovnej zveri, ako aj ďatlových stromov používaných na stavbu plavidiel radikálne a rýchlo zredukovali možnosti obživy domorodcov, až napokon vyústili do kanibalizmu (DIAMOND 2008). Príbeh Veľkonočného sotrova je pre nás varovnou metaforou – tak ako je tento ostrov osamotený v oceáne (vzdialený 2 000 km od najbližšieho ostrova v Polynézii), tak aj Zem je osamotená v obrovskom priestore nám ľuďom známeho vesmíru a v prípade náhlych nepriaznivých zmien Zemského systému nemáme kam uniknúť.

Zdá sa, že vnímanie deteriorizácie ekosystémov a bezmocnosť z nedostatočného zmierňovania negatívnych antropogénnych vplyvov na životné prostredie ovplyvňujú aj duševné zdravie ľudí. Rastú ich obavy z daného stavu, čo sa označuje ako **environmentálny žiaľ** (*environmental grief*) alebo **environmentálna úzkosť** (*eco-anxiety* alebo *climate anxiety*). Prejavuje sa rôzne, od úzkostných obáv o seba a vlastných potomkov až ku strate zmyslu života a rezignácii, ale tiež zlosťou alebo pocitmi vlastnej viny za daný stav Zeme, čo môže viesť k hlbokým depresiám (CONSOLO & ELLIS 2018). S tým súvisí nová koncepcia, zaoberajúca sa úzkosťou ľudí, ktorú spôsobujú environmentálne zmeny spojené s ich domácim prostredím. Tá sa na rozdiel od nostalgie či melanchólie, ktorú jednotlivci zažívajú, keď sú oddelení od milovaného domova, označuje pojmom **solastalgia** (ALBRECHT et al. 2007; WARSINI et al. 2014).

Dôležité je, že riziko kolapsu nás núti premyslieť doterajšie trendy a opustiť deštruktívnu konzumnú orientáciu. Z ekologického hľadiska je neudržateľné, aby iracionálne tézy nekonečného ekonomického rastu, z ktorých profitujú predovšetkým silné nadnárodné korporácie, boli nadradené potrebám ochrany, udržania a obnovy život udržiavajúcich systémov Zeme. Je najvyšší čas prijať našu nezameniteľnú ľudskú zodpovednosť za budúcu tvár Zeme. V kontexte vysokej zložitosti a nelinearity správania sa živých systémov, ktorá znižuje možnosti predvídateľnosti ich správania, je to mimoriadne náročná úloha.

Je potrebné ďalej na multidisciplinárnej báze rozvíjať poznanie Zemského ekologického systému a vplyvy antropogénnych narušení na jeho ekosystémy a ďalšie život udržiavajúce subsystémy. Súčasne je nevyhnutné analyzovať a systémovo riešiť nielen súčasný stav Zemského systému, ale aj hybné sily, ktoré sú generátormi súčasnej krízy, a to priame aj nepriame (načrtnuté v kapitole 1). Kľúčovým aspektom musí byť flexibilita pri definovaní cieľov a stanovení a realizácii praktických opatrení.

Amsterdamská deklarácia (prijatá v roku 2001 na konferencii Challenges of a Changing Earth)

- ✓ Zemský systém sa správa ako jedinečný atuoregulujúci sa systém, ktorý tvoria fyzické, chemické, biologické a ľudské komponenty, medzi ktorými existujú zložité interakcie a spätné väzby.
- ✓ Globálna zmena sa práve deje. Antropogénne zmeny povrchu pevnín, oceánov, pobreží a atmosféry, ako aj biologickej diverzity sa rozsahom a dôsledkami vyrovnajú veľkým prírodným silám.
- ✓ Globálnej zmene nemožno porozumieť na báze paradigmy jednoduchej kauzality. Antropogénne zmeny znamenajú viaceré zložité vplyvy, ktoré sa v Zemskom systéme kaskádovite šíria.
- ✓ Dynamiku Zemského systému charakterizujú kritické prahy a náhle zmeny. Ľudské aktivity môžu spustiť nevratné zmeny a spôsobiť nevratný prechod Zemského systému do operačného módu, ktorý bude pre človeka aj pre iné formy života menej priaznivý.
- ✓ Charakter, rozsah a rýchlosť zmien, ktoré v súčasnosti simultánne prebiehajú v Zemskom systéme, sú bezprecedentné. Zemský systém sa v súčasnosti nachádza v stave, ktorý nemá analógiu.

Zdroj: STEFFEN et al. 2020

Zhrnutie kapitoly 2

Od teórie systémov k biologickej a ekologickej komplexite

1) **Systém** tvoria fyzické prvky systému a vzťahy medzi nimi, ktoré tieto prvky prepájajú a súčasne systém organizačne vyčleňujú z jeho okolia. Každý systém charakterizujú jeho fyzické hranice, prvky

jeho štruktúry a ich vzájomné interakcie, ktorých zreťazením vznikajú procesy. Interakcie a procesy integrujú prvky systému do sietí, v ktorých prebiehajú toky a transformácie energie. Interakcie, procesy, cykly a rytmy systému sú tmelom, ktorý **integruje jeho prvky do dynamického a funkčného celku.** Tento celok sa vyznačuje kumulatívnymi aj emergentnými vlastnosťami.

2) Prvky, interakcie a procesy vytvárajú **siete,** ktoré prepájajú a integrujú prvky systému do dynamického funkčného celku prostredníctvom tokov a transformácií energie, hmoty a informácií. Rozmanité interakcie medzi prvkami fyzickej štruktúry a vzájomné pôsobenie na nej realizovaných procesov vytvárajú **vnútornú organizáciu,** usporiadanie systému, ktorá je v prípade živých systémov veľmi zložitá. K podstatným charakteristikám patrí aj prepojenosť prvkov systému, ich **konektivita.**
3) **Systémový prístup** charakterizuje dôraz na štúdium štruktúry, procesov a emergentných vlastností celku, tzn. spontánne sa objavujúcich vlastností, ktoré nie je možné odvodiť sumáciou výsledkov štúdia vlastností jeho prvkov. **Systémové vnímanie** zahŕňa nielen prvky, ale aj siete vzťahov medzi nimi, celistvosť a funkčnosť systému ako celku. Ide tu o presun dôrazu z diskrétnych prvkov, entít, na vzťahy a procesy, a vnímanie vysokej dynamiky a súčasne kontinuity interakcií a procesov.
4) Galéria prírodovedcov, ktorí prispeli k rozvoju systémového vnímania sveta okolo nás je početná. K prvým prírodovedcom, ktorý vnímal jednotu prírody a Zem ako živú entitu patril geológ **James Hutton.** Komplexnosť a celostnosť výskumu bola vlastná **Alexandrovi von Humboldt,** ktorý spájal botaniku a geografiu do základov nového odboru, biogeografie. Významná je aj teória sukcesie a klimaxu, ktorej prvými protagonistami sú americkí botanici **Henry Chandler** a **Frederic Clements**. Priekopník vedeckej ekológie, sir **Arthur George Tansley** definoval pojem ekosystém, ktorého komponentami sú organizmy aj zložky ich abiotického prostredia. Z moderných vedcov sa striktne systémovým prístupom k štúdiu ekológie vyznačoval predovšetkým **Eugen Odum** a jeho brat **Howard Odum**.
5) **Systémová ekológia** rozširuje skúmanie ekosystémov a interakcií ich prvkov o komplexný výskum tokov hmoty, energie a informácie v týchto systémoch. Študuje štruktúru, procesy, funkcie a správanie ekologických systémov ako zložito organizovaných, integrovaných a dynamických celkov. Súčasťou výskumu je aj poznávanie spoločných princípov organizácie systému. Napr. princíp vzniku emergentných vlastností spôsobuje, že živé systémy majú na každej hierarchickej úrovni vždy nové atribúty, ktoré nenájdeme na nižších úrovniach ich organizácie.
6) **Vysoká zložitosť organizácie, komplexita,** patrí k základným charakteristikám živých systémov. Takéto systémy charakterizujú nielen vysoké počty a rozmanitosť ich prvkov, ale tiež početnosť a rozmanitosť interakcií týchto prvkov a procesov, ako aj ich určitá vzájomná súhra, synchronicita, ktorá prostredníctvom spätných väzieb zabezpečuje dynamiku a funkčnosť celku. Táto zložitosť sa označuje buď ako **biologická komplexita** (na úrovni organizmov a všetkých ich hierarchicky nižších subsystémov) alebo ako **ekologická komplexita** (na úrovni ekologických systémov).
7) Podstatou koncepcie biologickej a ekologickej zložitosti je **idea spontánnej autoorganizácie** jednotlivých prvkov prostredníctvom ich vzájomných interakcií do vyšších funkčných celkov. Rozlišujú sa dva základné aspekty: 1) štrukturálna zložitosť – určujú ju počty a rozmanitosť prvkov a ich interakcií, hĺbka a priestorový rozsah hierarchií; 2) funkčná (behaviorálna) zložitosť – určujú ju počty a rozmanitosť procesov a stavov systému, ktoré sú obrazom jeho správania a dávajú mu identitu.

Globálne problémy v prizme Zemského (eko)systému

8) V súčasnosti sa rozvíja **systém vied o Zemskom ekologickom systéme** (Zemskom systéme) ako o najzložitejšom človeku známom systéme v doteraz poznanom vesmíre. Funkčnosť tohto celku zabezpečujú interakcie a procesy medzi jeho komponentami – najmä litosféry, atmosféry, hydrosféry, pedosféry a biosféry, ale aj noosféry. Široké spektrum fyzických, chemických a biologických procesov vnútri týchto komponentov aj medzi nimi zabezpečuje pre život potrebné toky energie a hmoty v Zemskom systéme, vrátane biogeochemických cyklov, ako aj prenosov informácie.
9) V systémovom pohľade sú osobitne cenné štúdie, ktoré hodnotia stav život udržiavajúcich systé-

mov Zeme a ich narušenia z pohľadu celku Zemského ekologického systému. Medzinárodné vedecké tímy pod vedením Johana ROCKSTRÖMA (2009) a Willa STEFFENA (2015) identifikovali **deväť kritických procesov, ktoré narúšajú život udržiavajúce systémy Zeme**. Určili tiež riadiace premenné týchto procesov a navrhli hranice bezpečia aktivít človeka. Pri analýze týchto procesov sa zistili vysoké narušenia subsystémov Zemského systému, bezprecedentné v celej ľudskej histórii.

10) V súčasnosti sú už prekročené **planetárne hranice** v prípade štyroch život udržiavajúcich systémov: tempo vymierania druhov 100- až 1000-násobne prekračuje prirodzené tempo vymierania, postupuje zmena klímy a jej následky sú už dnes pozorované a dramatické, silne narušené sú biogeochemické cykly dusíka a fosforu a rýchlo postupuje aj zmena krajinnej pokrývky. Procesy acidifikácie oceánov a spotreby vody sa k planetárnym hraniciam tiež rýchlo približujú. V prípade aerosólov v ovzduší a nových, neobvyklých entít planetárne hranice kvôli zložitosti týchto procesov zatiaľ neboli stanovené. Príbehom s pozitívnym koncom sa javí proces poškodzovania ozónovej vrstvy, keďže produkcia látok, ktoré v stratosfére ničia ozón, bola už z podstatnej časti vylúčená.

11) Koncepcia planetárnych hraníc nám pripomína, že žijeme na dynamickej Zemi, ktorej nelineárne správanie ilustrujú aj rozsiahle **náhle zmeny v minulosti**. Tieto zmeny nastávajú po prekročení určitých prahov (*thresholds*), hodnôt premenných riadiacich život udržiavajúce systémy Zeme. Takúto náhlu zmenu môže vyvolať aj malá zmena niektorého z početných faktorov, ktoré ovplyvňujú Zemský systém. Podľa autorov štúdie o planetárnych hraniciach v dôsledku vysokých antropogénnych tlakov nemožno v súčasnosti vylúčiť náhlu globálnu environmentálnu zmenu, s čím rastie aj riziko civilizačného kolapsu.

12) Súčasná vysoká intenzita antropogénnych vplyvov, ktoré zásadne ovplyvňujú Zemský systém, viedla niektorých vedcov k návrhu vyčleniť **nové geologické obdobie – Antropocén**. O začiatku Antropocénu sa vedú diskusie, prevažne sa spája s nástupom priemyselnej revolúcie, pričom vplyvy človeka exponenciálne rastú najmä od roku 1950. Ide o to, že naša civilizácia sa stala rozhodujúcou geologickou silou, ktorá mení povrch planéty, zanechávajúc na tvári Zeme hlboké a dlhodobé stopy.

13) V hre nie je zničenie života na Zemi, ale osud ľudskej civilizácie. Je našou spoločnou zodpovednosťou ďalej na multidisciplinárnej báze rozvíjať poznanie Zemského systému a vplyvy antropogénnych narušení na ekosystémy a ďalšie život udržiavajúce subsystémy. Systémovo vnímať, analyzovať a riešiť nielen stav tohto systému, ale aj pokračujúci nárast nepriamych hybných síl, ktoré sú generátormi súčasnej environmentálnej krízy a to si vyžaduje súbežne riešiť aj jej sociálne, kultúrne a ekonomické aspekty.

Kontrolné otázky

1) Charakterizujte systém (prvky a ich väzby, organizáciu celku, vlastnosti).
2) V čom spočíva systémový prístup k riešeniu problémov?
3) V čom sú práce A. Humboldta a ďalších významné zo systémového a celostného pohľadu?
4) Čo je predmetom a cieľom štúdia systémovej ekológie?
5) Čo je podstatou koncepcie zložitosti, komplexity?
6) Čím sa zaoberá štúdium biologickej resp. ekologickej komplexity?
7) Vysvetlite pojem Zemský ekologický systém (resp. Zemský systém).
8) Vysvetlite koncepciu planetárnych hraníc.
9) Narušenie ktorých život udržiavajúcich systémov už možno prekročilo limity bezpečia ľudstva?
10) Čo je to Antropocén?

Námety na kritické zamyslenie

1) Používate systémový prístup pri riešení problémov? Poznáte aj jeho limity?
2) Aké výhody resp. nevýhody majú podľa Vás snahy definovať ekologické limity Zeme?
3) Aké sú podľa Vás prínosy a aké riziká koncepcie Antropocénu?

„Najkrajšie pocity vyplývajú zo záhad. Sú to pocity, ktoré stoja pri kolíske skutočného umenia a skutočnej vedy. Človek, ktorý tento pocit nepozná, človek, ktorý sa už nevie diviť a ktorý nevie žasnúť, je prakticky mŕtvy. Je ako zhasutá svieca.“

Albert Einstein

3 Od atómov k prírodným zdrojom a obehu hmoty

Porozumieť princípom organizácie zložitých živých systémov si vyžaduje poznať základné stavebné kamene hmoty a fundamentálne sily tejto organizácie: interakcie, energie a informácie. V tejto kapitole sa venujeme otázkam týkajúcim sa stavebných kameňov hmoty a biogeochemických cyklov. Neživá príroda a jej postupne sa zvyšujúca organizácia od elementárnych častíc, cez atómy, chemické prvky a ich zlúčeniny až k hviezdam a planétam a jej dynamika predstavuje mohutnú „anorganickú kostru“, ktorá je, zdá sa, nevyhnutná pre vznik a podporu života. Ako to dosvedčuje aj syntéza ťažších prvkov v „taviacich peciach“ hviezd mnohonásobne mohutnejších ako je naše Slnko.

Mohutnosť vesmíru a život v ňom

Vek vesmíru sa odhaduje na 13,77 miliardy rokov, vek Zeme na 4,5 mld rokov a evolúcia života začala pred cca 3,8 mld rokov. Základné stavebné kamene života, kvarky a atómy, sú rovnaké v celom vesmíre, v neživej aj v živej prírode. Zásadný rozdiel tu robí až organizácia hmoty, na ktorej sa podieľajú aj toky energie a informácie. Zložitosť a usporiadanosť živých systémov je neporovnateľne vyššia ako v neživej prírode.

Zem je jediná známa planéta podporujúca život, čo kontrastuje s obrovskou rozľahlosťou a vekom vesmíru. Podľa anglického astronóma, sira Martina Reesa, sú však práve gigantické rozmery a vek vesmíru podmienkou existencie života.

Mliečna dráha a planéta Jupiter vychádzajúca nad púšťou Atacama v Južnej Amerike.
Foto: © Zdeněk Bardon, 2019.

Život sa mohol objaviť až potom, ako boli k dispozícii potrebné chemické prvky a ich zlúčeniny. Život stavia aj na syntéze ťažších chemických prvkov vnútri mohutných hviezd a pri výbuchoch supernov ako aj na „jemnom vyladení“ fyzikálnych konštánt, ktoré umožnili vývoj vesmíru a života. Túto záhadu sa moderná fyzika snaží vysvetliť najmä na báze teórie multiverza, t.j. miliárd rôznych vesmírov, v ktorých panujú rozdielne a náhodne generované fyzikálne konštanty a jeden z nich je ten náš.

Isaac Newton vypočítal, že planéty našej slnečnej sústavy sa v dôsledku gravitačnej sily Slnka pohybujú po vypočítateľných orbitálnych dráhach. Takto to funguje po desiatky miliónov rokov, ale raz za veľmi dlhý čas sa situácia dramaticky zmení. A to vtedy, keď sa najväčšie planéty, Jupiter a Saturn, dostanú na jednu priamku so Slnkom a Zemou. (Zmenu ich dráh, sklonu aj orientácie osí majú na svedomí veľmi malé oscilácie vyvolané napr. pôsobením slnečného vetra.) Spoločný gravitačný ťah týchto veľkých planét môže zmeniť kruhové dráhy niektorých asteroidov v ich pásme medzi Marsom a Jupiterom na eliptické. Ak sa Zem dostane do dažďa asteroidov katapultovaných z tohto pásu, rastie pravdepodobnosť jej zrážky s väčším telesom, ktorá môže spôsobiť až katastrofu planetárnych rozmerov. Počítačové modely preukázali, že obdobia masových vymieraní druhov zaznamenané v geologickej histórii Zeme korešpondujú práve s konjunkciami Jupitera a Saturna.

Martin Rees vníma širšie ohrozenie našej civilizácie. Na univerzite v Cambridge vedie Centrum pre výskum existenciálnych rizík, ktoré môžu viesť k veľkým planetárnym katastrofám. Patrí k nim napr. pád meteoritu, výbuch supersopky, zmena klímy, terorizmus, šírenie smrteľných vírusov, riziká nukleárnej vojny, syntetickej biológie, replikujúcich sa nanostrojov a super inteligentných robotov.

Upravené podľa: VARADI et al. 1999; CHOWN 2004; REES 2004

3.1 Stavebné kamene neživej aj živej hmoty

Hranice poznania hmoty sú posúvané objavmi vzdialených galaxií, aj jej najmenších častíc. **Hmotou** sa vo fyzike v širšom zmysle nazýva substancia, ktorá sa prejavuje ako látka alebo silové pole. **Látkou** sa označuje hmota v užšom zmysle, prejavujúca sa vo forme diskrétnych útvarov, ktoré majú nenulovú pokojovú hmotnosť a energiu a zaberajú určitý priestor. Môže sa nachádzať v jednom zo štyroch základných skupenstiev: v tuhom, tekutom, plynnom a ako plazma. **Pole** má vlnovú povahu a nulovú pokojovú hmotnosť, pôsobí na prvky a systémy v jeho okolí. Rozlišuje sa najmä gravitačné, elektromagnetické a jadrové pole, s ich pôsobením súvisia gravitačné, elektromagnetické a jadrové sily.

3.1.1 Základné stavebné kamene hmoty a rozpínajúci sa vesmír

Subatómové častice hmoty a základné interakcie

Subatómové častice hmoty sú extrémne malé častice, ktoré budujú štruktúru atómu. Zložené častice ako sú protóny a neutróny sú sami tvorené fundamentálnymi (elementárnymi) časticami, ktoré sú ďalej nedeliteľné. Rozlišujú sa **kvarky, leptóny a bozóny**, z ktorých každá má aj svoju antičasticu. Základnými vlastnosťami elementárnych častíc sú hmotnosť, elektrický náboj, spin a magnetický moment, výnimkou sú gluóny a fotóny, ktorých hmotnosť je nulová.

Medzi týmito časticami pôsobia **štyri základné interakcie** (nedeliteľné na menšie interakcie):

1) gravitácia je najslabšou interakciou, ale s najväčším priestorovým dosahom,

2) elektromagnetická sila pôsobí medzi elektricky nabitými časticami,

3) slabá jadrová interakcia umožňuje interakciu kvarkov a leptónov (jej nosičmi sú bozóny W a Z),

4) silná jadrová interakcia udržiava v jadrách atómov spolu kvarky, protóny a neutróny napriek tomu, že protóny nesúce všetky kladný elektrický náboj sa odpudzujú (nosičmi tejto sily sú gluóny).

Subatómové (elementárne) častice

Kvarky. Rozlišuje sa šesť základných kvarkov (u, d, c, s, t, b), ktorým zodpovedá šesť antičastíc – antikvarkov. Pri rozlišovaní kvarkov podľa kombinácií *„farby, vône a pôvabu“* však ich počet vzrastie až na niekoľko desiatok. Pôsobia na ne všetky základné interakcie. Kvarky budujú zložitejšie subatomárne systémy – hadróny, z ktorých najstabilnejšie sú protóny a neutróny. Protóny drží v jadre spolu silná interakcia.

Leptóny. Na tieto častice nepôsobí silná interakcia. Tri druhy nesú záporný elektrický náboj (elektrón, mión, tauón) a ďalšie tri sú neutrína, s oveľa menšou hmotnosťou ako má elektrón a s nulovým elektrickým nábojom. K nim existuje šesť antičastíc, napr. antičasticou k elektrónu je pozitrón s kladným elektrickým nábojom.

Bozóny. Umožňujú prenos sily elektromagnetického poľa (fotóny), slabej interakcie (W a Z bozóny) a silnej interakcie (gluóny). Za teoretický objav Higgsovho bozónu, potvrdený v roku 2013 vo veľkom Hadrónovom urýchľovači Európskej organizácie pre jadrový výskum získali Peter Higgs a Francois Englert Nobelovu cenu za fyziku za rok 2013.

Zdroj: KREMPASKÝ 1982; REES 2004; NOBEL PRIZE 2013

Stavba atómu

Kladne nabité **protóny** a **neutróny** (tie sú bez elektrického náboja) vytvárajú **jadrá atómov**, ktoré nesú jeden alebo viac kladných elektrických nábojov. Atómy sú miniatúrnymi stavebnými kameňmi chemických prvkov a tým všetkej hmoty (samy sú tvorené subatómovými časticami). Počet protónov v jadre udáva **atómové číslo** chemického prvku a súčet protónov a neutrónov udáva jeho **hmotnostné číslo.** (Napr. atóm uhlíka ^{12}C má hmotnostné číslo 12 a atómové číslo 6, to znamená, že ho tvorí 6 protónov a 6 neutrónov.)

Napriek tomu, že jadro je extrémne malé, je v ňom skoncentrovaná takmer všetka hmota atómu. Okolo jadra v pomerne obrovských vzdialenostiach „obiehajú“ záporne nabité **elektróny,** každý s jedným elementárnym záporným nábojom a o niekoľko rádov menšou hmotnosťou (oproti jadru). Napriek našej zmyslovej skúsenosti s pevnými telesami podstatnú časť objemu každého atómu vypĺňa prázdny priestor (v prípade atómu vodíka je to 99.9999999999996 %). Veľkosť atómu vyjadruje vzdialenosť od stredu jadra až po jeho elektrónový obal, čo môže byť 30 až 300 pm (trilióntin metra).

Atómy majú približne rovnaký počet elektrónov ako protónov. Elektróny sú kľúčové pri mnohých fyzikálnych a chemických javoch. Elektrón, ktorý absorbuje určité presné množstvo energie môže byť excitovaný na **energeticky vyššiu dráhu**, ktorá je od jadra vzdialenejšia, naopak, pri vyžiarení určitého množstva energie prejde na energeticky nižšiu dráhu. Na dráhe, ktorá je najbližšie k jadru môžu byť najviac dva elektróny, na ďalších je to najviac po 8 elektrónov. (Preto uhlík ^{12}C, ktorý má 6 protónov a 6 elektrónov, má na prvej dráhe 2 elektróny a na druhej 4 elektróny a 4 miesta sú neobsadené). Chemicky stabilné sú tie atómy, ktoré majú na orbitálnych dráhach elektrónmi obsadené všetky miesta.

Chemické prvky sú atómy s rovnakým atómovým číslom. Usporiadané sú v Mendelejevovej periodickej tabuľke, v ktorej sa označujú chemickou značkou, ktorá je skratkou ich latinských alebo gréckych názvov (napr. sodík: Na – natrium, meď: Cu – cuprum, olovo: Pb – plumbum). V roku 2019 bolo známych **118 rôznych chemických prvkov**, z ktorých 98 sa vyskytuje v prírode, všetky ostatné boli získané synteticky.

Biogénne prvky sú tie chemické prvky, ktoré sú konštantne prítomné v organizmoch a ktoré sú významné pre ich prežívanie, rast a rozmnožovanie. Najvýznamnejšími biogénnymi prvkami sú H, O, C, N, Na, P, Ca. V menších množstvách (< 0,1 % hmotnosti organizmu) sa v organizmoch nájdu aj Mg, K, Fe, S, Cl, Br, v stopových množstvách I, Zn, Cu, Co, Mn, Li, Mo, Si (a ďalšie, v závislosti od organizmu).

Ak sa atómy toho istého chemického prvku odlišujú počtom neutrónov v jadre (napr. v prírode je popri uráne ^{235}U hojnejší urán ^{238}U, ktorý má v jadre atómu až 146 neutrónov), hovoríme o **izotopoch.** Najbežnejší prvok vesmíru, vodík, bežne tvorí jeden protón a jeden elektrón, kým jeho ďalšie dva izotopy majú v jadre jeden až dva neutróny (nazývajú sa deutérium a trícium). Atómy, ktoré majú nestabilné, spontánne sa rozpadajúce jadro (neutrón sa rozpadá na protón a na elektrón) sú **rádioizotopy**. (napr. ^{14}C má polčas rozpadu 5 730 rokov, v prípade ^{238}U je to až 4,468 miliardy rokov). Keďže tieto pri rozpade emitujú žiarenie, môžu sa využívať na sledovanie procesov v biologických systémoch.

Spájaním atómov vzniká ďalšia hierachická úroveň hmoty – molekuly. Molekuly samotné sú prvkami ešte zložitejších anorganických a organických zlúčenín. Pritom sa uplatňujú rôzne typy väzieb.

Niektoré významné typy väzieb medzi atómami aj molekulami

Iónové väzby vznikajú presunom jedného alebo viac elektrónov medzi atómami, čím vznikajú kladne nabité katióny a záporne nabité anióny. Takáto väzba je veľmi silná (napr. Na^+Cl^-, $Mg^{2+}O^{2-}$, $Ca^{2+}CO_3^{2-}$). Výsledné zlúčeniny sú pevné a ťažké, tvoria kryštály, majú vysoké body topenia a varu, kovy dobre vedú elektrický prúd už v pevnom skupenstve, nekovy iba keď vo vode disociujú na katóny a anióny.

Častice kovu v pevnom skupenstve môže viazať aj kovová väzba, ktorá v pravidelnej mriežke kryštálov viaže jeho katióny, kým elektróny sa môžu voľne pohybovať v spoločných pásoch.

Kovalentné väzby spočívajú v zdieľaní jedného alebo viac párov elektrónov medzi atómami nekovov v molekule, ktorú tvoria atómy bez náboja (napr. H_2, O_2, N_2, CO_2, NH_3). Zlúčeniny s takýmito väzbami majú nižšie body topenia a varu, nízku tepelnú vodivosť a nevedú elektrický prúd.

Vodíkové väzby predstavujú prípad veľmi slabej kovalentnej väzby, ktorá spočíva v nerovnomernom zdieľaní elektrónov atómami vodíka a kyslíka, čím vznikajú slabé čiastočné náboje (kladné v prípade vodíka a záporné v prípade kyslíka). Tieto opačné náboje sú zdrojom príťažlivých síl medzi molekulami vody, ale tiež jej jedinečných vlastností, ktoré majú kritický význam pre existenciu organického života na Zemi.

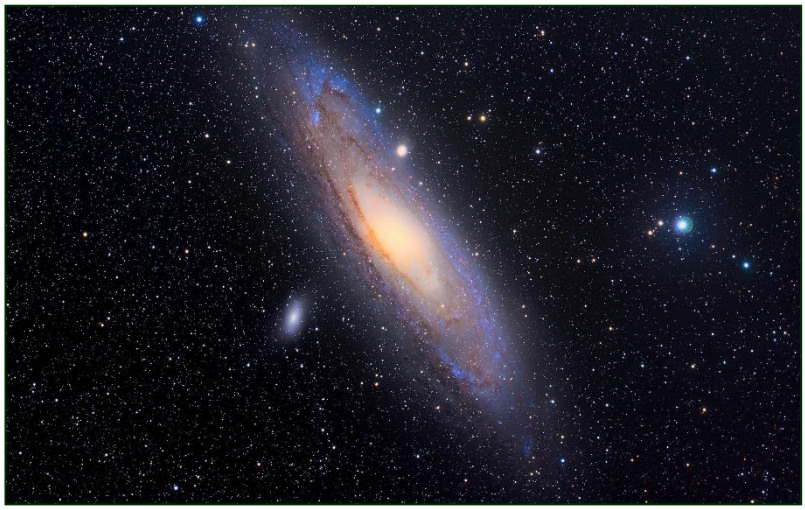
Zdroj: OPAVA 1982; MILLER 2005

Rozpínajúci sa vesmír a „hviezdne pece“ stavebných kameňov života

Každý hmotný prvok a systém, od elementárnych častíc a atómov až po hviezdy a galaxie má svoju dynamiku. Americký astronóm Edwin Hubble v roku 1929 na základe meraní žiarenia vzdialených galaxií a ich relatívnych vzdialeností prišiel s teóriou **rozpínajúceho sa vesmíru**. Na jeho pozorovania a na Einsteinovu teóriu relativity nadväzuje teória **Veľkého tresku** (*Big Bang*). Vychádza z predstavy extrémne horúceho a hustého vesmíru, ktorého všetka energia bola skondenzovaná do tzv. **singularity**. V tejto singularite bola nepredstaviteľne vysoká teplota a tlak, priestor ani čas akoby neexistovali (resp. neboli merateľné) a ani dnes známe fyzikálne zákony ešte neexistovali.

Veľký tresk v užšom zmysle označuje začiatok rozpínania vesmíru z pôvodnej singularity približne pred 13,8 miliardami rokov. Ako sa extrémne horúci vesmír pri rozpínaní postupne ochladzoval, vznikli najprv elementárne častice a z nich protóny a neutróny a tým aj baryonová hmota (schopná vyžarovať alebo odrážať žiarenie – preto je viditeľná). **Jadrovou syntézou** neskôr pribudli dva najhojnejšie prvky vesmíru – vodík (H) a hélium (He). Za nasledujúcich asi 10 000 rokov ďalej klesla teplota vesmíru a hustota látky sa zvýšila natoľko, že sa prejavilo pôsobenie gravitácie – približne 400 mil. rokov od Veľkého tresku sa už vytvorili prvé hviezdy a zhruba za miliardu rokov prvé galaxie (ALLES 2013, obr. 3.1).

Túto teóriu potvrdil v roku 1965 objav tzv. **reliktného žiarenia**. Ide o kozmické mikrovlnné žiarenie, ktoré je pozostatkom z obdobia krátko po Veľkom tresku a ktorého existenciu táto teória predpokladala (DURRER 2008). Jednotlivé galaxie sa v rozpínajúcom sa vesmíre od seba neustále vzďaľujú. Naša slnečná sústava sa nachádza vo vonkajšej oblasti špirálovitej galaxie, ktorú poznáme ako **Mliečna dráha**.



Obr. 3.1. Veľká hmlovina v súhvezdí Andromeda je špirálovitá galaxia s priemerom 220 miliónov rokov a hmotou rovnajúcou sa trilionu našich slnc je vzdialená od Zeme 2,5 milióna svetelných rokov. Táto galaxia by sa asi za 4,5 miliardy rokov mala zraziť s galaxiou našej Mliečnej dráhy. *Foto:* © Zdeněk Bardon, 2012.

Pre existenciu organického života sú však nevyhnutné aj ťažšie chemické prvky (ako je hélium) ako sú uhlík, dusík a kyslík, ale tiež horčík, kremík, fosfor, síra, draslík, vápnik, mangán, železo, nikel a ďalšie. **Ich jadrová syntéza si vyžaduje obrovský tlak a teplotu**, ktoré existujú v jadrách masívnych hviezd. Prvky ťažšie ako železo vznikajú najmä (mnohé iba) pri výbuchoch supernov (ktoré nastávajú po „vyhorení paliva“ a gravitačnej kontrakcii jadra masívnych hviezd alebo po špecifickom vývoji niektorých bielych trpaslíkov). Vedci pozorovali, že napr. nedávna supernova SN 2005E bola mimoriadne bohatá na vápnik (PERETS et al. 2010), kým historická supernova SN 185, ktorú v roku 185 zaznamenali Číňania, bola bohatá na železo. Výbuchy supernov tieto prvky rozmetajú do nesmiernych diaľok vesmíru a základný stavebný materiál pre život je tým k dispozícii novým generáciám slnečných sústav.

Gravitácia ako jedna z podmienok života

Pre existenciu života sú významné základné interakcie a ďalšie vlastnosti hmoty. Napríklad **gravitácia** vyjadruje vzájomnú príťažlivosť medzi ľubovoľnými dvoma hmotnými telesami a dáva váhu fyzickým objektom. Udržiava pohromade telesá zložené z atómov, ale aj hviezdy a planéty na ich obežných dráhach. Na Zemi sa prejavuje v podobe zemskej príťažlivosti pre ľubovoľné telesá v blízkosti jej povrchu. Tým umožňuje udržanie oceánov a zemskej atmosféry a podmieňuje aj existenciu biogeochemických cyklov. Gravitácia tiež obmedzuje veľkosť a tvary organizmov a ekosystémov.

Gravitačný zákon a veľkosť elektrickej sily

Gravitácia. Podľa všeobecného gravitačného zákona sa dva hmotné body navzájom priťahujú gravitačnou silou Fg, ktorej veľkosť je priamo úmerná súčinu ich hmotností (m_1, m_2) a nepriamo úmerná druhej mocnine vzdialenosti ich centier (r): $F_g = G \bullet (m_1 \bullet m_2) / r^2$, kde G je gravitačná konštanta ($6{,}67 \times 10^{-11}$ N kg^{-1} m^3 sec^{-2}). Intenzita gravitačného poľa E_g vo vzdialenosti r od hmotného telesa je $E_g = G \bullet (m) / r^2$.

Elektrická sila. Podľa Coulombovho zákona jej veľkosť F_e je priamo úmerná absolútnej hodnote súčinu veľkostí elektrických nábojov (q_1, q_2) a nepriamo úmerná druhej mocnine vzdialenosti telies (r) a permitivite (mierou odporu) prostredia (ε) : $F_e = | q_1 \bullet q_2 | / 4\pi \bullet \varepsilon \bullet r^2$. Intenzita elektrického poľa E_e vo vzdialenostri r okolo telesa s elektrickým nábojom q sa vypočíta nasledovne: $E_e = q / 4\pi \bullet \varepsilon \bullet r^2$.

Zdroj: KREMPASKÝ 1982

Podobne významná je **elektrická sila**, ktorou na seba pôsobia telesá s elektrickým nábojom a ktorá udržiava pokope atómy, ale aj zlúčeniny spojené iónovými väzbami. Telesá s opačným elektrickým nábojom sa v dôsledku tejto sily priťahujú, telesá s rovnakým nábojom sa odpudzujú.

Temná hmota vesmíru

Astronómovia a fyzici už desaťročia skúmajú aj fenomén „*temnej hmoty*" a „*temnej energie*". Temná hmota sa vyznačuje tým, že na rozdiel od baryonovej hmoty neinteraguje so svetlom (nepohlcuje ho, neodráža, ani neemituje). To znamená, že nie je ju možné vidieť. Možno ju však detekovať, odhadovať jej hmotnosť aj mapovať jej rozmiestnenie vo vesmíre. Pôsobenie tejto hmoty sa totiž prejavuje gravitačne - predovšetkým ovplyvňovaním zakrivenia svetla míňajúceho masívne objekty aj zvyšovaním rýchlostí pohybu hviezd.

Pozorovania a výpočty potvrdili, že z hľadiska ich príspevku k priemernej hustote energie, náš vesmír obsahuje 20 % temnej hmoty, 75 % temnej energie a iba 5 % normálnej (atómovej) hmoty. Temná hmota vo vesmíre teda výrazne prevažuje nad látkou svietiacich a so svetlom interagujúcich objektov. Vyzerá to tak, že galaxie sú obklopené a prestúpené masívnymi diskami tmavej hmoty, ktoré sa napr. v našej Mliečnej dráhe rozpínajú až do vzdialenosti 300 000 – 600 000 svetelných rokov. Obrovská gravitačná sila týchto diskov udržiava miliardy hviezd v galaxii pohromade. Gigantické zhluky hviezdnych galaxií sú vnorené do ešte gigantickejších mrakov tmavej hmoty a sú pohromade aj napriek stále rýchlejšie sa rozpínajúcemu vesmíru.

Zdroj: CALDWELL & KAMIONKOWSKI 2009; GORENSTEIN & TUCKER 2014

Teória jemne vyladeného vesmíru

K najväčším záhadám vesmíru patrí jeden zo zatiaľ nerozriešených problémov fyziky, a síce, že náš vesmír je akoby „jemne vyladený" pre život („*fine tuned universe*"). Základom pre toto tvrdenie je skutočnosť, že ak by kľúčové fyzikálne konštanty boli iba o veľmi málo iné, vo vesmíre by nemohol vzniknúť a rozvíjať sa život. Slávny britský astronóm sir Martin REES (2004) analyzuje šesť z týchto kritických konštánt. Jednou z nich je aj **číslo N**, pomer intenzity elektromagnetických síl voči gravitačnej sile, $N = 10^{36}$. Elektromagnetické sily udržiavajú pokope atómy, gravitácia pôsobí medzi atómami, udržiava planéty a hviezdy, slnečné sústavy a galaxie. Ak by N bolo menšie, (napr. $N = 10^{30}$), gravitácia by bola veľmi silná a objekty aj vzdialenosti medzi nimi by boli rádovo menšie. Galaxie aj celý vesmír by mali miniatúrne rozmery a krátku životnosť, čo by neumožnilo evolúciu života. Naopak, pri väčšom N by gravitácia bola oveľa slabšia a vesmír by iba slabo držal pokope, čo by zásadne ovplyvnilo vznik a vývoj hviezd.

Ďalšia **konštanta Ɛ** vyjadruje intenzitu silnej jadrovej interakcie, napr. mieru účinnosti nukleárnej fúzie vodíka na hélium. Ɛ = 0,007 znamená, že hélium má 99,3 % hmotnosti jeho stavebných kameňov (t.j. dvoch protónov a dvoch neutrónov) a 0,7 % ich pôvodnej hmotnosti sa v procese syntézy premenilo na energiu. Ak by Ɛ bolo iba o trochu menšie (napr. Ɛ = 0,006), „nukleárny lep" držiaci pohromade protóny a neutróny by bol slabý na to, aby vznikli zložitejšie atómové jadrá. Naopak, ak by tento „lep" bol silnejší (napr. Ɛ = 0,008), vesmír by tvorili iba ťažšie jadrá, vodík by sa spotreboval už na jeho za-

čiatku, nebola by k dispozícii voda a nevznikol by ani život. Okrem fyzikálnych konštánt sú jemne vyladené aj ďalšie parametre, napr. veľmi jemný rozdiel v hmotnosti protónu a neutrónu a iné.

Záhada jemne vyladeného vesmíru už desaťročia vyvoláva diskusie. Náboženské hľadisko vidí za týmto vesmírom Boha resp. „Inteligentného dizajnéra" ktorý existuje mimo vesmír a cieľavedome ho vyladil tak, aby sa v ňom mohol vyvinúť inteligentný život. Z materialistických vysvetlení je najznámejšia teória „multiverza". Podľa nej náš vesmír zaberá iba relatívne malý priestor fyzickej reality, ktorú tvorí nekonečné množstvo hypotetických vesmírov. Táto fyzická realita nie je nijako vyladená, ale v jednom vesmíre sa čírou náhodou stretli také fyzikálne podmienky a zákony, ktoré umožnili vznik života.

3.1.2 Od molekúl k bunke, základnej organizačnej jednotke života

Väčšina hmoty existuje vo forme molekúl a zlúčenín. **Molekula** je kombináciou dvoch alebo viacerých atómov rovnakého chemického prvku (napr. O_3) alebo niekoľkých chemických prvkov, ktoré sú udržiavané spolu chemickými väzbami (napr. CO_2). **Zlúčenina** je chemicky čistá látka, ktorá pozostáva z jednoduchých alebo viacerých molekúl tvorených atómami dvoch alebo viacerých chemických prvkov (napr. CO_2, H_2CO_3). Môžu ju tvoriť aj zložitejšie komplexy rovnakých molekúl. **Anorganické zlúčeniny** neobsahujú typické uhlíkovo-vodíkové väzby a vytvárajú podstatnú časť zemskej kôry (a celý zemský plášť).

Vyššia úroveň organizácie, organické zlúčeniny

Organické zlúčeniny sú tvorené atómami uhlíka v kombinácii s atómami jedného alebo viacerých iných prvkov, najmä vodíka (H), kyslíka (O), dusíka (N), fosforu (P), síry (S), chlóru (Cl), fluóru (F) a ďalších. Ak by sa vo vesmíre objavil život aj mimo Zeme, pravdepodobne by tiež vychádzal zo zlúčenín uhlíka. Reťazce atómov uhlíka (C) sú totiž vďaka jeho schopnosti viazať sa kovalentnými väzbami so širokým spektrom iných atómov „chrbticou" rozmanitých organických zlúčenín (WILKINSON 2007).

Základné skupiny organických zlúčenín

Uhľovodíky obsahujú iba uhlík a vodík; väčšina prírodných uhľovodíkov sa nachádza v rope a v zemnom plyne (napr. najjednoduchší uhľovodík metán – CH_4), ale napr. tiež vo včelom vosku. Rozlišujú sa podľa druhu väzieb, napr. nasýtené, nenasýtené a aromatické uhľovodíky. V alkoholoch sú atómy vodíka nahradené hydroxilovou skupinou OH. Človek vytvoril aj halogénované uhľovodíky, v ktorých je jeden alebo viac atómov vodíka nahradených atómami halogénov (Cl, F, Br, I) – napr. insekticídy a polychlórované bifenyly obsahujú chlór, freóny obsahujú chlór a fluór, halóny obsahujú bróm.

Cukry (sacharidy, glycidy) obsahujú atómy uhlíka, vodíka a kyslíka v pomere 1:2:1. K jednoduchým cukrom (monosacharidom) patrí napr. glukóza a fruktóza ($C_6H_{12}O_6$, odlišujú sa štruktúrou). Oligosacharidy sú krátke reťazce monosacharidov, spojených kovalentnými väzbami (napr. glukóza a galaktóza vytvárajú laktózu). Polysacharidy vznikajú zreťazením mnohých, často stoviek až tisícov monosacharidov. Najznámejšími sú celulóza, škrob, glykogén a chitín. Celulóza je hlavný stavebný materiál rastlín; škrob je u rastlín zásobnou formou sacharidov. Ekvivalentnom škrobu u živočíchov je glykogén, ktorý sa nachádza v pečeni a svaloch.

Tuky (lipidy) sú tvorené veľkými, zložito organizovanými molekulami, ktoré slúžia ako zásobníky energie a na výstavbu membrán. Zahŕňajú tuky, oleje, vosky a ďalšie látky (napr. steroidy, dôležité pre regulovanie funkcií bunky). Mnohé tuky obsahujú mastné kyseliny, v prípade rastlín prevažne nenasýtené, u živočíchov nasýtené. Fosfolipidy sú štrukturálnym základom bunkových membrán.

Bielkoviny (proteíny) sú vysokomolekulárne látky tvorené zložitými kombináciami veľkých počtov aminokyselín. Tisíce druhov proteínov sa vytvárajú iba z 20 druhov aminokyselín. Zo všetkých organických molekúl sú proteíny štrukturálne aj funkčne najrozmanitejšie, pričom funkcie závisia od ich štruktúry (podľa zreťazenia aminokyselín a „prehýbania štruktúr" sa rozlišujú štyri úrovne štruktúry). Proteíny sú významnou súčasťou každej bunky ako stavebné látky, ale aj enzýmy, hormóny a pod. Živočíchy nedokážu syntetizovať všetky aminokyseliny a tie esenciálne musia získavať z potravy.

Základné skupiny organických zlúčenín – pokračovanie

Nukleové kyseliny, deoxyribonukleová (DNA) a ribonukleová kyselina (RNA), obsahujú uhlík, vodík, kyslík, dusík a fosfor. Tvorené sú reťazcami malých organických molekúl, nukleotidov. Nukleotidy sa viažu do dvojíc (G – C, A – T a A – U), čím vytvárajú kód pre zápis genetickej informácie. Dva prepojené reťazce nukleotidov sú stočené do dvojzávitnicovej špirály. Úseky DNA zodpovedajúce jednotkám genetickej informácie sa nazývajú gény. Súbor všetkých génov jedinca v chromozómoch jadra bunky tvorí jeho genotyp, súbor všetkých génov danej populácie je genofond a súbor všetkých génov daného druhu je genóm.

Zdroj: BUCHAR et al. 1987; STARR et al. 2013; UNIVERSITY OF WASHINGTON 2013

Organické zlúčeniny sú organizované do reťazcov, ktoré sú otvorené alebo obsahujú cykly, pričom **môžu vytvárať štrukturálne rozsiahle a zložité systémy**. Tieto zlúčeniny preto oproti anorganickým zlúčeninám predstavujú výrazne vyššiu úroveň organizácie a tým aj zložitosti. V súčasnosti je registrovaných takmer desať miliónov organických zlúčenín (ich naprostá väčšina je organického pôvodu). Môžu sa členiť napríklad podľa skupín atómov v molekule, ktorých väzby im dávajú typické emergentné vlastnosti; takto sa rozlišujú uhľovodíky, sacharidy, bielkoviny (charakteristické viacrozmerným usporiadaním makromolekúl), tuky, nukleové kyseliny, vitamíny, alkaloidy a iné.

S ďalšou organizáciou organických zlúčenín sa spája vznik života, ktorého objasnenie stále patrí k veľkým výzvam vedeckého výskumu. Podľa KÜPPERSA (1990) zahŕňa tri skupiny otázok:

1) Ako vznikli organické makromolekuly, ako sú proteíny a nukleové kyseliny, tvorené zložitou organizáciou, jedinečným reťazcovým, cyklickým a iným usporiadaním ich stavebných prvkov (monomérov)?
2) Ako postupnou integráciou organických makromolekúl vznikli zložité hyperštruktúry, ktoré už boli podobné živým bunkám, pričom ich funkcie definovalo usporiadanie makromolekúl?
3) Ako prebiehala ďalšia diferenciácia týchto hyperštruktúr a súčasne ich integrácia smerom k vyššej zložitosti, až k vzniku živej bunky?

Küppers vidí vysvetlenie vo fyzikálnych a chemických zákonoch a v biologickej informácii, podľa neho musela byť prítomná už na úrovni makromolekúl určujúc možnosti vývoja štruktúr prvých organizmov.

Bunka je základnou organizačnou jednotkou života

Najmenšia živá organizačná entita organizmu (štrukturálna a funkčná jednotka) je bunka. Bunky sú veľmi rozmanité, odlišujú sa tvarom, štruktúrou a vlastnosťami. Každá má **cytoplazmatickú membránu,** ktorá oddeľuje obsah bunky od okolia a súčasne ho s ním prepája, prepúšťa určité látky, t.j. je selektívne permeabilná. Vnútorné prostredie bunky tvorí **jadro** a **cytoplazma**, čo je rôsolovitá hmota tvorená vodou a v nej rozpustenými či rozptýlenými iónmi, anorganickými a organickými látkami, ktorá tvorí prostredie pre organely a inklúzie (telesá zo zásobných alebo odpadových látkok, solí a pigmentov). **Organely** sú priestorovo odlíšené fyzické štruktúry bunky, z ktorých každá má z hľadiska jej metabolizmu špecifickú funkciu a spravidla ju obklopuje membrána (z funkčného hľadiska je organelou aj cytoplazmatická membrána). **Prokaryotické bunky** nemajú odlíšené jadro, ich organely nie sú oddelené membránami a viaceré typy organel zložitejších eukaryotických buniek chýbajú (napr. mitochondrie). **Eukaryotické bunky** majú bunkové jadro, aj membránami ohraničené organely (obr. 3.2).

Väčšina buniek je viditeľná iba pod mikroskopom. Veľkosť buniek je limitovaná hraničnými hodnotami **podielu jej povrchu voči jej objemu,** ktoré ešte umožňujú aby metabolizmus bunky bol v rovnováhe s tokmi živín a odpadov. Pri zväčšovaní bunky sa totiž jej objem zväčšuje niekoľko násobne rýchlejšie ako povrch. To znamená, že v prípade priveľkej bunky by prísuny živín a export odpadov cez plazmatickú membránu nestíhali potreby metabolizmu, ktorý bunku udržiava pri živote (STARR et al. 2013).

Vlastnosti buniek vysvetľuje **bunková teória** (sformulovaná už v 19. storočí, STARR et al. 2013):

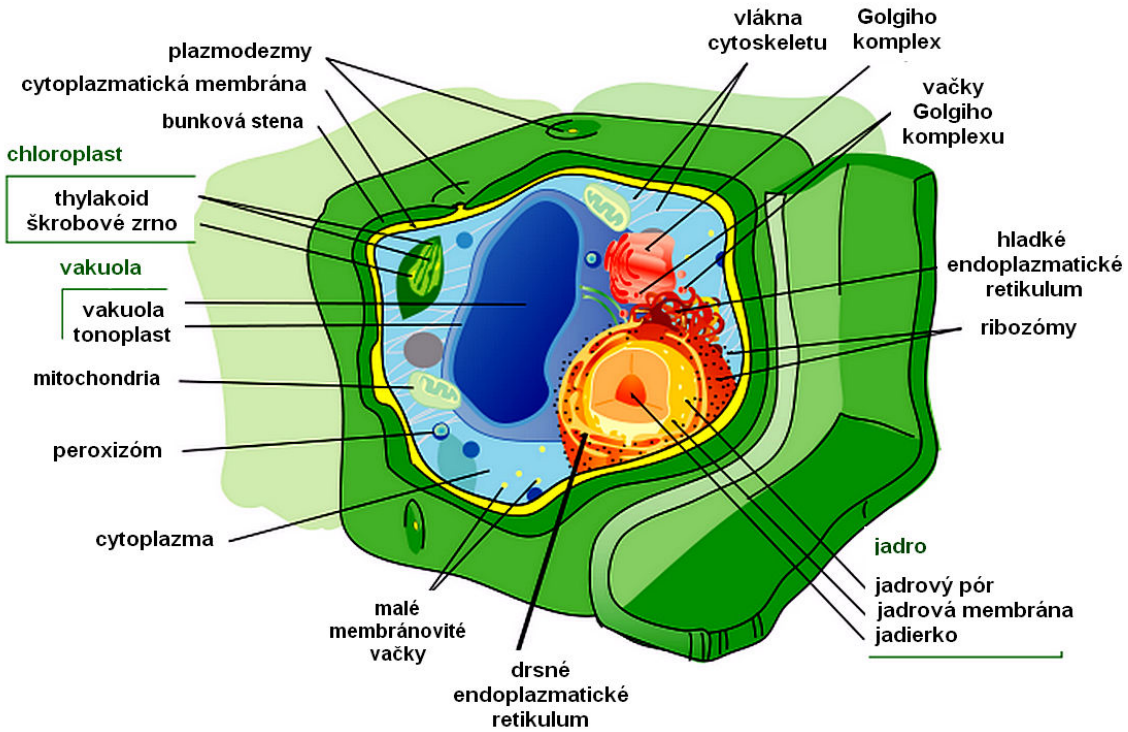
1) Každý živý organizmu pozostáva z jednej alebo z viacerých buniek.
2) Bunka je základnou štrukturálnou a organizačnou jednotkou organizmu.

3) Všetky bunky vznikajú delením pred nimi existujúcich živých buniek.

To znamená, že bunka je základnou štrukturálnou a funkčnou jednotkou života, je individuálne živá aj vtedy, ak je súčasťou mnohobunkového organizmu. Dnes už tiež vieme, že bunky obsahujú aj dedičnú genetickú informáciu, ktorú počas delenia odovzdávajú dcérskym bunkám.

Súčasťou každej bunky je **deoxyribonukleová kyselina (DNA),** biologická makromolekula vo forme reťazca nukleotidov. V jednoduchšej a objemovo výrazne menšej **prokaryotickej bunke** sa DNA nachádza v cytoplazme, v zložitejšej **eukaryotickej** bunke sa hlavná časť DNA nachádza v jadre oddelenom membránou (menšie molekuly DNA sú uložené aj v mitochondriách a chloroplastoch). Hlavný štrukturálny rozdiel spočíva v rozčlenení eukaryotickej bunky membránami na kompartmenty, vnútri ktorých sa realizujú špecifické metabolické aktivity (obr. 3.2). Táto vyššia štrukturálna zložitosť je dôvodom, prečo je objem eukaryotickej bunky 100 až 1 000 krát väčší ako je objem prokaryotickej bunky.

Živé bunky sú zložité systémy, ktoré si vyžadujú neustály prísun energie, ktorá je potrebná na produkciu, organizáciu, udržiavanie a pohyb ich komponentov, ako aj samotných buniek. Fyzická štruktúra bunky pritom nie je statická. Všetky organely a špecializované domény bunky sa dynamicky menia, v závislosti tak od stavu vnútorného prostredia bunky ako aj od vonkajších stimulov. V tejto súvislosti stojí za povšimnutie, že napriek vysokej biodiverzite majú všetky živé organizmy podobnú biochémiu: k svojej výstavbe potrebujú približne 20 – 25 chemických prvkov, pričom biochemické procesy musia prebiehať v určitom rozsahu ich rýchlostí (JØRGENSEN 2012).



Obr. 3.2. Štruktúra eukaryotickej rastlinnej bunky: **cytoplazmatická membrána** oddeľuje bunku od vonkajšieho prostredia a riadi toky látok dnu a von; **bunková stena** ju chráni a podporuje; **plazmodezmy** sú jemné kanáliky spájajúce susedné bunky; cytoplazmu tvorí rôsolovitá zmes vody, iónov, anorganických a organických látok – cukrov, tukov a proteínov, v ktorej sú tiež uložené organely a inklúzie; **jadro** chráni DNA pred príp. škodlivými reakciami v cytoplazme; **ribozómy** syntetizujú proteíny; **drsné endoplazmatické retikulum** proteíny modifikuje; **hladké endoplazmatické retikulum** syntetizuje lipidy, rozkladá cukry a tuky, deaktivuje toxíny; **Golgiho komplex** finalizuje, triedi a transportuje tuky, enzýmy a proteíny; **cytoskelet** je dynamická sieť proteínových vlákien a tubulov, ktoré podporujú tvar a pevnosť bunky, podieľajú sa na komunikácii buniek a umožňujú pohyb organel; **chloroplasty** sú zodpovedné za fotosyntézu; **mitochondrie** sú energetické centrá, ktoré štiepia cukry; **peroxizómy** deaktivujú toxíny; **malé membránovité vačky** (lyzozómy) trávia a recyklujú látky; **centrálna vakuola** je zásobáreň vody, anorganických a organických látok, skladuje odpady bunkového metabolizmu. *Upravené podľa:* Mariana Riuz Villarreal (LadyofHats), český preklad Michal Maňas. Wikimedia, Public Domain.

Zvyšovanie biologickej zložitosti pokračuje ďalej, **eukaryotické bunky sa organizujú do hierarchicky zložitejších štruktúr** – do pletív a tkanív, orgánov, systémov orgánov až do organizmov. Energia v kombinácii s informáciou kódovanou v DNA vedie k zložitej organizácii živých organizmov, ktorá sa v priebehu evolúcie spravidla zvyšuje (ADAMI et al. 2001). Evolučne najvyšší organizmus, ľudské telo, pozostáva asi z 30 až 100 triliónov buniek, ktorých činnosť je vzájomne vysoko koordinovaná.

Organizmy vytvárajú populácie, spoločenstvá a ekosystémy, krajiny, až po Zemský ekologický systém, tu už hovoríme o ekologickej zložitosti. Z predošlej kapitoly už vieme, že **biologické a ekologické systémy sú vysoko zložité** tak z pohľadu štruktúry, ako aj funkcií, ktoré sú ňou determinované.

3.1.3 Prírodné zdroje v systémovej perspektíve

Príroda v modernom chápaní je súhrnom všetkých objektov, procesov a systémov, ktoré existujú v priestore v rozmanitých podobách a nevytvoril ich človek. **Prírodný zdroj** je súčasť prírody, ktorú človek využíva alebo môže využiť na plnenie svojich potrieb a záujmov, v rámci existujúcich technických a socioekonomických podmienok, napr. ako energiu, potravu, minerály, palivá, vlákna (MIKLÓS & IZAKOVIČOVÁ 1997). Poznáme hmotné, energetické, informačné a priestorové prírodné zdroje (obr. 3.4). Významným prírodným zdrojom je aj genetická informácia, ktorá riadi výstavbu zložitých živých systémov.

Štandardné členenie prírodných zdrojov

Konvenčný pohľad na prírodné zdroje sa sústreďuje na hmotné a energetické zdroje, ktoré vníma predovšetkým z pohľadu ich využiteľnosti človekom. Tieto sa spravidla klasifikujú na (trvale) obnoviteľné (prakticky nevyčerpateľné), ďalej na obnoviteľné ale vyčerpateľné (degradovateľné, obr. 3.3) a napokon na neobnoviteľné prírodné zdroje (minerály, horniny a fosílne palivá). Nie tak dávno sa tento pohľad rozšíril aj o dva nehmotné zdroje: priestor a polohu (Miklós in IZAKOVIČOVÁ et al. 1997).

Konvenčná klasifikácia prírodných zdrojov (hmotných, energetických a priestoru)

a) trvale obnoviteľné prírodné zdroje **(**napr. slnečné žiarenie, vetry a globálna cirkulácia ovzdušia, morské prúdy a vlny, aj gravitáciou poháňaná tečúca voda sú prakticky nevyčerpateľné.

b) obnoviteľné (a degradovateľné) prírodné zdroje sú potenciálne obnoviteľné v človeku primeranej dobe (hodiny, roky až niekoľko desaťročí) bez zásahu človeka (napr. čistý vzduch a voda, travinné a stromové porasty, lovná zver a iná biomasa, ekosystémy a ich služby). Ak je však rýchlosť ich obnovy prekonaná rýchlosťou ich využívania, dochádza k ich vyčerpávaniu a degradácii.

c) neobnoviteľné prírodné zdroje (fosílne palivá, kovové minerály, nekovové minerály, horniny) sú vyčerpateľné, resp. sú obnoviteľné len v priebehu nesmierne dlhých geologických období, ktoré sa vymykajú merítkam nášho času. Z pohľadu merítka civilizácie zásoby týchto zdrojov ich čerpaním ubúdajú.

d) priestor krajiny a poloha ako nehmotné prírodné zdroje: priestor vyjadruje zjednocujúci rámec, geometrický atribút povrchu krajiny. Poloha na zemskom povrchu ovplyvňuje možnosti ľudských aktivít.

Upravené podľa: MILLER 2005; MIKLÓS in IZAKOVIČOVÁ et al. 1997

Kvalita prírodných zdrojov označuje ich dostupnosť a využiteľnosť. Hmotný prírodný zdroj má tým vyššiu kvalitu, čím je jeho látka koncentrovanejšia, napr. rudná žila, hustota populácií lovených živočíchov a pod. (MILLER 2005). Zvyčajne sa ťažia najprv zdroje vyššej kvality a až pri ich nedostatku a následným rastom ceny príslušného zdroja na trhu sa využívajú aj tie menej kvalitné. Napr. rastúca spotreba ropy a jej vysoká cena viedla k environmentálne veľmi spornej ťažbe z dechtových pieskov. Ťažba menej kvalitných zdrojov však má ekologické a ekonomické limity, ktoré súvisia s veľkými objemami spracúvaných surovín a s vynakladaním značnej energie.

Zákon zachovania hmoty a limity využívania prírodných zdrojov

Tak ako nemôžeme vytvoriť ani zničiť protóny, neutróny a elektróny, **nemôžeme vytvoriť ani zničiť**

hmotu. V systéme, ktorý je otvorený pre toky hmoty a energie môžeme vytvárať nové zlúčeniny a iné zas rozkladať alebo môžeme meniť koncentráciu určitej látky. Zmenu tejto koncentrácie za jednotku času vyjadruje vzorec: dC/dt = (vstup látky - výstup látky + generované produkty – transformované a spotrebované reaktanty) /V, kde dC je zmena koncentrácie, dt je časová jednotka a V je objem systému (JØRGENSEN 2012).

Na Zem sice dopadajú meteority, ale vzhľadom k jej obrovskej hmotnosti je ich príspevok zanedbateľný. Hmotu Zeme preto s malým zjednodušením môžeme považovať za konečnú. To však znamená, že aj **prírodné zdroje Zeme sú konečné**, takl z pohľadu abiotických aj biotických zdrojov. Z pohľadu zákona o zachovaní hmoty každý sociálny, ekonomický a politický systém, ktorý vedie k neustálému rastu čerpania materiálových aj energetických zdrojov Zeme je nevyhnutne iracionálny a neudržateľný.

V prípade neobnoviteľných zdrojov sa nové minerály sice môžu dostávať na povrch z hĺbok zemskej kôry či plášťa, ale s výnimkou sopečnej činnosti sa to deje iba v dlhých geologických obdobiach, to znamená, že z pohľadu dĺžky existencie ľudskej civilizácie sú tieto zdroje neobnoviteľné. **Neobnoviteľné zdroje** by sme preto nemali čerpať rýchlejšie ako je nachádzanie ich nových ložísk alebo náhrad inými zdrojmi. Napr. čerpania ropy, dnešného kľúčového fosílneho plaiva, sa týka aj široko diskutované približovanie sa k *„ropnému zlomu“* (vrcholu ťažby ropy, MURRAY & KING 2012).

V prípade **obnoviteľných zdrojov** by intenzita a rýchlosť ich čerpania nemali presiahnuť prirodzené možnosti obnovy týchto zdrojov. Napr. čerpanie podzemných vôd by nemalo prevýšiť možnosti ich prirodzeného dopĺňania, ani výruby v lesoch by v priemere nemali prevýšiť rýchlosť prírastku drevnej hmoty.

Obr. 3.3. Národný park Grand Canyon, lokalita Svetového dedičstva (Arizona, USA). Synergia tektonických pohybov (dvíhanie náhornej plošiny) a eróznej činnosti rieky Colorado za milióny rokov vyhĺbila kaňon dlhý 446 km, s najväčšou hĺbkou 1 600 m. Farebné skalné masívy tu tvoria vrstvy hornín z rôznych geologických období (vrátane prekambria). Voda rieky Colorado je ukážkou obnoviteľného, ale tiež vyčerpateľného prírodného zdroja. V dôsledku veľkých odberov vody (aj pre Las Vegas, mnohomiliónové mesto v púšti) rieka na dolnom toku nemá po niekoľko mesiacov v roku dosť vody, aby dotiekla až k moru. *Foto:* © Michael Hüttl, 2009.

Ekosystémové služby

Okrem prírodných zdrojov závisí život ľudí aj od ďalších služieb, ktoré nám poskytujú ekosystémy: od regulácie klímy, cez zabezpečenie zdrojov vody, pôdy pre pestovanie plodín, až k ochrane biodiverzity, ale tiež k ponuke krásy, poznania a duševného obohatenia. Ide o novší, systémový prístup ku klasifikácii úžitkov pre ľudskú spoločnosť, ktoré nám plynú z najrozmanitejších typov ekosystémov.

Funkcie ekosystémov predstavujú potenciál prírodných, poloprírodných, ale do určitej miery aj antropogénnych ekosystémov zabezpečovať prostredníctvom ich produktov a prebiehajúcich biologických a ekologických procesov potreby všetkých obyvateľov ekosystémov, vrátane ľudskej spoločnosti, v širšom rámci, než aký predstavuje koncepcia prírodných zdrojov (napr. de GROOT 1992; ZACHAR 2004; ČABOUN 2007). Tie funkcie ekosystémov, z ktorých má ľudská spoločnosť konkrétne úžitky sa nazývajú **ekosystémovými službami** (COSTANZA et al. 1997; DAILY et al. 2002). Fyzická štruktúra a procesy prebiehajúce v ekosystémoch podmieňujú ich funkcie a tým aj potenciál ekosystémových služieb (obr. 3.5).

Ekosystémové služby (ES) sú podstatné pre prežitie civilizácie, štruktúry a procesy, ktoré ich generujú sú vysoko zložité a realizujú sa v takých rozsiahlych merítkach, že podstatnú väčšinu z nich nemôžu nahradiť žiadne supermoderné technológie. DE GROOT et al. (2002) medzi prvými rozlíšili štyri kategórie

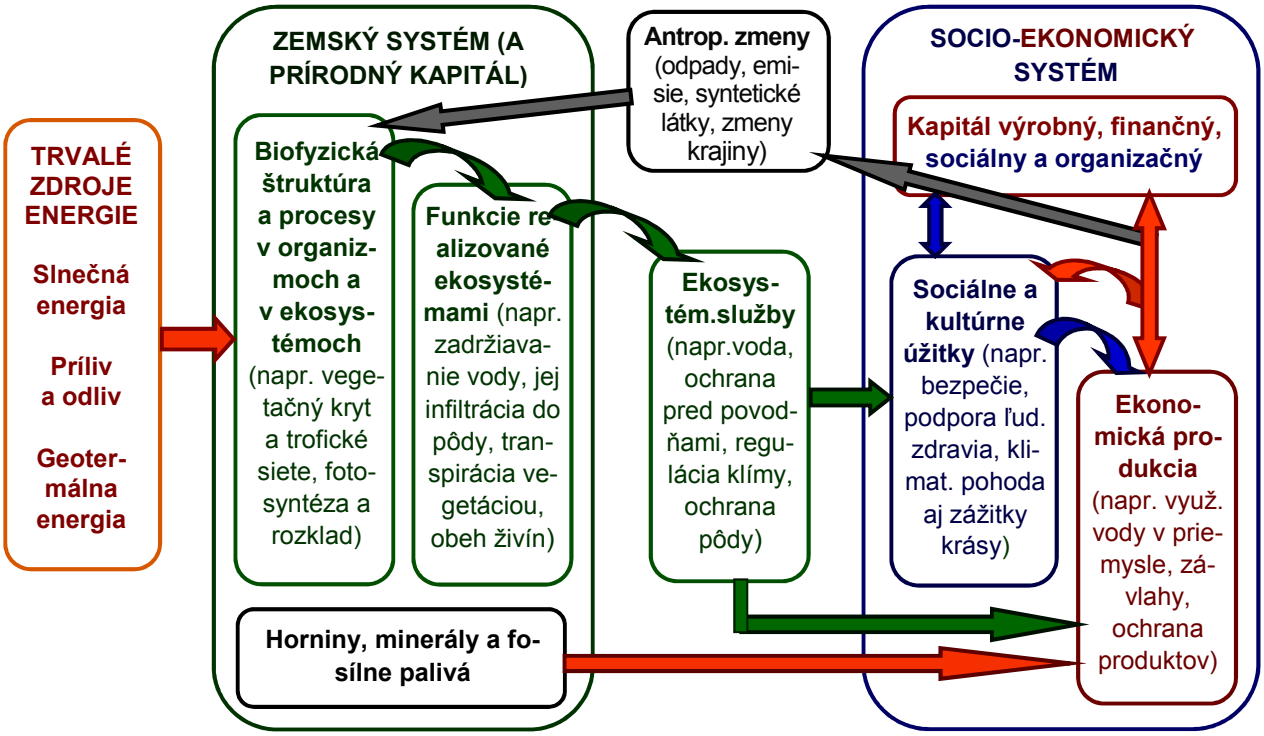
ekosystémových služieb: 1) regulačné ES, ktoré regulujú podstatné ekologické procesy (napr. biogeochemické cykly); 2) biotopové (podporné) ES, ktoré poskytujú biotopy pre organizmy; 3) produkčné ES, ktoré spočívajú v produkcii živej biomasy a 4) informačné (kultúrne) ES, ktoré poskytujú príležitosti pre poznávanie, výskum, ale aj turistiku, rekreáciu, zakúšanie krásy a duchovné obohatenie.

Každý typ ekosystému a každá krajina poskytujú určité spektrum ekosystémových služieb v ich určitých kapacitách (BURKHARD et al. 2009; TOMAŠKIN & TOMAŠKINOVÁ 2018), čo je možné využiť na hodnotenie ekologických dôsledkov zmien krajiny (napr. odlesňovania, rozorávania lúk a pod).

Podľa COSTANZU et al. (2014) bola v roku 2011 globálna hodnota všetkých ES 125 triliónov USD, pričom oproti roku 1997 v dôsledku degradácie ekosystémov klesla o 4,3 - 20,2 triliónov USD. Keďže hranicu medzi podporujúcimi a regulačnými službami je niekedy ťažké stanoviť, pre praktické účely sa tieto dve kategórie zvyknú spájať. V Európskej environmentálnej agentúre bola vytvorená hierarchická **Spoločná medzinárodná klasifikácia ekosystémových služieb** (CICES – *Common International Classification of Ecosystem Services*), ktorá ich člení už iba do troch kategórií – **zásobovacie (produkčné), regulačné a kultúrne služby** (CICES 2019; KANIANSKA et al. 2016). (Vzhľadom k závažnosti problematiky ES a jej previazanosti s ekologickou integritou krajiny sa im podrobnejšie venujeme v druhom dieli učebnice.)

Prírodný kapitál

Život je výsledkom bezpočtu rozmanitých interakcií atmosféry, litosféry, hydrosféry, biosféry a stále viac aj noosféry – sféry pretvorenej človekom. Biosféra je často nesprávne chápaná ako globálny ekologický systém, v skutočnosti je iba kľúčovým komponentom **Zemského ekologického systému**, ktorého všetky komponenty sú vysoko dynamické. Hybnými silami procesov sú tu toky energie, jej transformácie a akumulácia, biogeochemické cykly, toky informácie a jej odovzdávanie potomkom.



Obr. 3.4. Modifikovaný kaskádový model, systémový pohľad na vzťah Zemského systému a socio-ekonomického systému. Hlavné trvalé zdroje energie generujú a udržiavajú štruktúru a procesy v organizmoch a ekosystémoch. Tie sú základom ekosystémami realizovaných funkcií. Planetárny prírodný systém, zásoby prírodných zdrojov, produkty a funkcie ekosystémov predstavujú prírodný kapitál, ktorý generuje toky ekosystémových služieb využívané socio-ekonomickými systémami našej civilizácie.
Schéma: © Peter Sabo, *námet podľa*: POTSCHIN & HAINES-YOUNG 2011; HÄYHÄ & FRANZESE 2014

So zákonom zachovania hmoty úzko súvisí pojem **prírodný kapitál.** V tradičnej ekonomike sú kapitálom zdroje, ktoré umožňujú tvorbu produkcie a zisku, čo deformuje koncepciu skutočného bohatstva spoločnosti (EKINS et al. 1992). Prírodný kapitál predstavujú všetky biologické a ekologické fyzické štruktúry – krajina, horniny, minerály a pôda, voda, ovzdušie, ekosystémy, biodiverzita a všetky v nich prebiehajúce fyzikálne, chemické, biologické a ekologické procesy. Synergia pôsobenia biofyzikálnych štruktúr a procesov vedie ku generovaniu ekosystémových funkcií a tým aj **ekosystémových služieb,** od ktorých závisí existencia aj prosperita ľudstva (POTSCHIN & HAINES-YOUNG 2011).

To ilustruje tzv. **kaskádový model**, ktorý znázorňuje vzťahy medzi biofyzikálnou štruktúrou ekosystému a na nej prebiehajúcimi procesmi, funkciami ekosystému, ekosystémovými službami a ich využívaním ľudskou spoločnosťou. Na obr. 3.4. prezentujeme **modifikovaný kaskádový model** ilustrujúci tieto vzťahy. Pôvodný, široko používaný model autorov POTSCHIN & HAINES-YOUNG (2011) totiž považujeme za nepresný, pretože hodnoty prisudzuje až poslednému článku kaskády, konkrétnemu využitiu služby v socio-ekonomickom systéme. Avšak **hodnoty je potrebné prisúdiť aj priamo ekosystémom** a ďalším život udržiavajúcim systémom, ktoré tieto služby generujú, t.j. prírodnému kapitálu.

Koncepcia prírodného kapitálu znamená, že tento musí **vstupovať do ekonomického správania**, ekonomických modelov a do účtovníctva štátov, pretože jeho súčasná rozsiahla degradácia v konečnom dôsledku ohrozuje existenciu ľudskej civilizácie. Základom pre riešenie všetkých súčasných veľkých globálnych environmentálnych výziev je preto zastaviť túto degradáciu a naopak, **chrániť a obnoviť prírodný kapitál Zeme.** Posledná globálna environmentálna správa Programu OSN pre životné prostredie (UNEP 2019) pritom uvádza, že na dôslednú ochranu tohto kapitálu cez detoxikáciu, dekarbonizáciu, určitú dematerializáciu ekonomiky a obnovu ekosystémov by stačilo investovať iba asi 2 % svetového hrubého domáceho produktu (*global GDP*, *Gross Domestic Produc*t).

Ochrana a posilnenie prírodného kapitálu je dnes **súčasťou environmentálnej politiky Európskej únie**, je jedným z troch strategických cieľov 7. environmentálneho akčného plánu EÚ (EU 2013). V súčasnosti je to však viac v deklaratórnej rovine, pretože napr. v rámci sústavy Natura 2000 iba 23 % chránených druhov a iba 16 % chránených biotopov európskeho významu má dobrý status ich ochrany. Súčasťou plánov obnovy tohto kapitálu je **posilnenie zelenej infraštruktúry v krajine**. Ekologická zložitosť však spôsobuje, že medzi krokmi, ktoré EÚ podniká na zníženie antropogénnych tlakov na ekosystémy a viditeľným ozdravením prírodného kapitálu Európy existuje určité časové oneskorenie (EEA 2019).

Systémový pohľad na prírodné zdroje

Systémový pohľad nám hovorí, že prírodné zdroje planéty nemôžu slúžiť iba človeku, pretože sú nevyhnutné aj pre život ďalších organizmov. Tieto zdroje vstupujú do zložitých interakcií s organizmami, ktoré obývajú biosféru, vrátane ich interakcií s ľudskou populáciou. Z pohľadu konkrétneho organizmu resp. populácie konkrétneho druhu **prírodným zdrojom je všetko, čo tento organizmus resp. populácia potrebuje k svojmu prežitiu, rastu a reprodukcii.** Preto je etické a súčasne ekologicky nevyhnutné podeliť sa o dostupné prírodné zdroje aj s mimoľudskými formami života – minimálne v miere nevyhnutnej pre fungovanie ekosystémov, krajín, ekoregiónov a Zemského systému, a tým aj pre udržanie kapacity ekologických systémov podporovať existenciu a prosperitu ľudskej spoločnosti.

Systémový pohľad na prírodné zdroje mení pohľad na ich čerpanie človekom. Už nestačí, aby ich využívanie bolo šetrné, ale treba brať do úvahy aj **nevyhnutnosť ochrany a udržania biologickej diverzity, ekologickej zložitosti a integrity dotknutých ekosystémov**. Ťažba neobnoviteľných zdrojov, najmä minerálov a fosílnych palív spravidla **vedie k rozsiahlemu znečisťovaniu ovzdušia, vody a pôdy.** Pri povrchovej ťažbe naviac dochádza k likvidácii celých ekosystémov. Živé organizmy môžu ohrozovať aj toxické chemikálie (napr. ťažké kovy splachované z banských háld alebo ohrozenie vodných tokov kyanidom pri jednej z metód ťažby zlata). V takomto prípade je potrebné zvažovať nevyhnutnosť ťažby, ochrániť priľahlé biotopy pred znečisťovaním a inou devastáciou, a po ukončení ťažby ňou zasiahnuté územie revitalizovať. Napríklad ťažba piesku na lokalitách výskytu včelárika zlatého (*Merops apiaster*) môže narušiť jeho biotop, ale pri citlivom prístupe môže vytvoriť aj nové hniezdne možnosti.

Vysoké vstupy prírodných zdrojov do socioekonomického systému a produkciu odpadov môžeme znížiť zvyšovaním efektívnosti využitia spotrebúvaných materiálov a energií. Dôležité je tiež poučiť sa z prírody a prostredníctvom triedenia odpadov a ich recyklácie presmerovať ich časť späť do výrobných procesov vo forme druhotných surovín. Širšou koncepciou je **obehová (cirkulárna) ekonomika**, ktorú predstavujú uzavreté ekonomické systémy zamerané na elimináciu odpadov a kontinuálne využívanie prírodných zdrojov na báze opakovaného používania, opravovania a recyklovania produktov, komponentov a materiálov (Európska komisia v marci 2020 prijala Akčný plán obehovej metodiky, EC 2020). Treba však vidieť, že obehom zdrojov v obehovej ekonomike ušetríme materiály, ale nie energiu.

Na rozdiel od minerálov a fosílnych palív, **obnoviteľné zdroje dokáže príroda obnovovať**. Ak ich však ťažíme rýchlejšie ako je tempo ich obnovy, skôr – neskôr dochádza k ich vyčerpaniu alebo k degradácii. Príkladmi sú vyčerpávanie zdrojov povrchovej a podzemnej vody, nadmerný zber lesných plodov, nadmerný, neregulovaný alebo ilegálny lov zveri a rýb (ROCKSTRÖM et al. 2009). Nestačí však riadiť sa iba rýchlosťou obnovy týchto zdrojov. Napr. pri vysokých odberoch vody z potokov a riek na zavlažovanie polí sa jej dočasný nedostatok môže prejaviť zmenou fyzikálnych a chemických faktorov, ktoré môžu viesť k zmenám druhového zloženia riečnych a mokraďových ekosystémov, k masívnym úhynom rýb a iných sladkovodných organizmov. Z pohľadu ochrany biodiverzity a ľudského zdravia je dôležité udržať tak kvantitu ako aj kvalitu obnoviteľných prírodných zdrojov, napr. čistotu vodných tokov.

3.2 Obeh látok, život udržujúce cykly a ich narušenie

Všetky organizmy vyžadujú k svojmu životu, pre svoj rast a rozmnožovanie **živiny,** chemické prvky alebo potravu. Prvotným zdrojom živín pre rastliny sú **minerály** a **horniny** v zemskej kôre, z ktorých sa jednotlivé prvky uvoľňujú mechanickým a chemickým zvetrávaním. Kým spektrum živín je pre väčšinu organizmov podobné, ich relatívne vyžadované množstvá a spôsoby získavania sú často špecifické. Napr. pomer uhlíka k dusíku (C:N) je u človeka 1 : 6, kým u rastlín môže byť 1 : 10 až 1 : 40 (CAIN et al. 2014). Výsledkom synergie zvetrávania, pôsobenia živých organizmov, vody a gravitácie je **pôda,** ktorú tvoria minerálne častice, odumretá organická hmota (detrit), voda, rozpustené živiny, plyny, ako aj živá zložka pôdy – **edafón** (korene rastlín, mikroorganizmy a drobné živočíchy). **Pôdotvorný proces** a vertikálny presun živín z vyšších do nižších vrstiev vytvára pôdne horizonty, na základe ktorých sa pôda člení na **pôdne typy.** Členenie na **pôdne druhy** súvisí so zastúpením rôznych zrnitostných frakcií v pôde. Na pôdotvorné procesy zásadne vplýva klíma, preto sa pôdy rôznych biómov výrazne odlišujú.

Zo zákona zachovania hmoty vyplýva, že život na Zemi by nebol možný bez vytvorenia miestnych až globálnych **cyklov biogeochemických prvkov,** ktoré spočívajú v kontinuálnom obehu vody, živín a ďalších chemických prvkov medzi atmosférou, hydrosférou, litosférou, pedosférou a biotou prostredníctvom rozmanitých fyzikálnych, chemických a biologických procesov. Všetky tieto cykly **poháňa** kontinuálny prísun slnečnej energie k zemskému povrchu, zemská gravitácia a pôsobenie živých organizmov (procesy asimilácie, konzumácie, rozkladu detritu, mineralizácie). Biogeochemické cykly sú tým miestne uzavretejšie, čím má ekosystém väčší objem biomasy alebo vyššiu biodiverzitu, napríklad splachovanie dusíka z odlesnených plôch je mnohonásobne vyššie ako je tomu v lese (SMITH 1996).

Obeh živín patrí k život udržiavajúcim systémom Zeme. Základom je **rozklad detritu** (neživej organickej hmoty), na ktorom sa v detritových reťazcoch podieľajú rozkladače (dekompozítory). Finálom procesov dekompozície je premena organických zlúčenín na anorganické, nazývaná **mineralizácia.** Ďalším procesom je premena anorganických látok pôsobením mikroorganizmov do formy, v ktorej ich môžu prijímať autotrofné organizmy. Výsledkom procesov rozkladu sú teda jednoduché a vo vode rozpustné anorganické a organické zlúčeniny, ktoré môžu byť absorbované autotrofnými organizmami.

Funkčnosť ekosystémov zabezpečuje aj **regulácia rýchlosti obehu živín**, ktorú ovplyvňuje klíma a vlhkosť pôdy. Táto rýchlosť je tým väčšia, čím je dostupných živín menej. Napr. vápnik, ktorého je relatívny dostatok globálne obieha približne 40-krát pomalšie ako fosfor, ktorého je výrazne menej (WILKINSON 2007). Rýchly obeh živín charakterizuje napríklad tropické dažďové pralesy, z ktorých pôd

sú živiny vymývané vysokými zrážkami a preto sú ich pôdy chudobnejšie ako je tomu u iných suchozemských ekosystémov. Živiny sú v týchto pralesoch sústredené podstatne viac v biote ako v pôde.

Systémový prístup k otázke biogeochemických cyklov

Keďže biogeochemické cykly patria k život udržujúcim systémom Zeme, ich narušenie vedie k závažným environmentálnym problémom. Systémový prístup k analýze týchto cyklov začína poznaním **zásobníkov** príslušného prvku resp. jeho zlúčenín – v zemskej kôre, pôde, vode, ovzduší a v biote. Po zmapovaní **procesov**, ktorými sa jednotlivé prvky presúvajú medzi ich zásobníkmi treba určiť, ktoré procesy a čím sú **narušené** v dôsledku činnosti človeka a analyzovať s tým spojené kauzálne a spätné väzby v ekosystémoch. Kladné spätné väzby účinky tohto narušenia zosilňujú, kým záporné spätné väzby ich zoslabujú. Až následne je možné odvíjať **návrhy a riešenia ako narušené cykly obnoviť**. Nižšie sa preto pristavíme pri hlavných biogeochemických cykloch – vody, uhlíka, dusíka, fosforu a síry.

3.2.1 Hydrologický cyklus a jeho narušenie

Keď vedci skúmajú prítomnosť života na iných planétach alebo mesiacoch, okrem parametrov týkajúcich sa toku slnečnej energie sa zameriavajú na hľadanie známok výskytu vody. Na Zemi moria a oceány pokrývajú 71 % jej povrchu a voda je objemovo značnou súčasťou každej živej bunky a každého organizmu.

Bez vody niet života

Voda je vďaka jej jedinečným vlastnostiam kritická pre existenciu života (napr. Miller 2005). Vodíkové väzby vedú ku viacerým emergentným vlastnostiam, ktoré sú pre život dôležité.

Silná vzájomná príťažlivosti medzi molekulami vody vedie ku **kohézii**, k tendencii molekúl sa vzájomne zhlukovať, vďaka ktorej voda voda môže tiecť a ako tekutina a vytvárať kvapky. Významné je, že voda je ako kvapalina na zemskom povrchu dostupná vo veľkom rozsahu teplôt (0 – 100 °C) a tým v širokom spektre rozmanitých klimatických pásiem. Táto príťažlivosť vedie tiež k **adhézii,** priľnavosti molekúl vody k povrchu pevnej látky. Synergia kohézie a adhézie umožňuje vode stúpať kapilárami rastlín od koreňov až do listov (v prípade najvyšších stromov tropických pralesov až do výšky 70 m).

Voda má **vysokú mernú tepelnú kapacitu** (nazývané aj merné teplo), čo označuje teplo potrebné na zohriatie jednotkového množstva látky (1 kg) o 1 °C. V tomto prípade vyjadruje schopnosť vody naakumulovať veľké množstvo tepla bez výraznej zmeny vlastnej teploty. Dôsledkom je, že moria a oceány, ale aj vegetácia na súši (keďže obsahuje a transpiruje značné objemy vody) stabilizujú podnebie. Táto vlastnosť chráni pred veľkými a náhlymi zmenami teploty aj organizmy, keďže tieto obsahujú značné objemy vody, v prípade človeka je to približne 60 % (MILLER 2005).

Voda má tiež **vysoké skupenské teplo** (nazývané aj latentné teplo), čo označuje teplo potrebné danej látke dodať resp. odobrať na zmenu skupenstva jednotkového množstva tejto látky. V prípade vody to znamená schopnosť odoberať veľké množstvo tepla pri topení snehu a výpare vody a naopak ho uvoľňovať pri tuhnutí vody na sneh a ľad. Táto vlastnosť umožňuje aby globálna cirkulácia atmosféry a morské prúdy transportovali veľkú časť tepla smerom od rovníka k pólom. Jarné topenie snehu na horách je za normálnych podmienok zväčša rozložené v čase, čo krajinu chráni pred záplavami a zabezpečuje aj vlahu pre polia v nížinách. Vysoké skupenské teplo vody sa uplatňuje aj pri ochladzovaní ľudského organizmu potením (pri práci, behu a inej námahe) a následným výparom potu.

Voda je aj **významným rozpúšťadlom mnohých látok**, vrátane živín, ktoré voda transportuje až do jednotlivých buniek živých organizmov. Využitím rovnakého princípu odvádza z týchto buniek a z organizmov aj odpadové látky. Paradoxne, táto životodarná vlastnosť vody umožňuje šíriť v riečnej sieti aj toxické látky, ktoré sa potom akumulujú v jazerách, nádržiach alebo v pobrežných zónach morí.

Pre život je významná aj **fyzikálna anomália vody**, ktorá znamená, že voda má najväčšiu hustotu pri teplote 3,98 °C. V dôsledku tejto anomále voda ako jedna z mála tekutín pri zamŕzaní zväčšuje svoj

objem, hovoríme, že „*ľad pláva na vode*“. To znamená, že voda zamŕza smerom od hladiny ku dnu, čo umožňuje sladkovodným organizmom prežívať aj pod hrubou vrstvou ľadu. Bez existencie tejto anomálie by všetok život pri zamŕzaní stojatých aj tečúcich vôd vždy vyhynul.

Dôležitá je aj určitá **priepustnosť vody pre viditeľnú zložku slnečného žiarenia** (závisí od čistoty vody). Voda zoslabuje **prienik pre organizmy nebezpečného UV-B žiarenia**, čo umožňuje život vodných rastlín a rias. Výsledkom je existencia rozmanitých sladkovodných a morských ekosystémov s jedinečnou biodiverzitou a spektrom produkčných, regulačných, život podporujúcich aj kultúrnych ekosystémových služieb.

Voda na Zemi

Zásobníky vody: Až 97,5 % všetkej vody tvorí slaná voda morí a oceánov. Zo sladkej vody jej 68,7% viažu ľadovce a 30,1 % prestavuje podzemná voda, to znamená, že povrchová voda a pôdna vlaha spolu predstavujú iba 1,2 % zásob sladkej vody, z nich sa v riečnej sieti nachádza iba 0,49 % (USGS 2016). Atmosférickú vodu predstavuje vodná para a zrážkové vody (dážď, sneh, ľadovec, námraza). Sladká voda je na zemskom povrchu distribuovaná veľmi nerovnomerne: najväčšie zásoby majú Antarktída a Grónsko (spolu asi 70 %), v prípade podzemnej vody najväčšie zásoby majú Ázia a Afrika (spolu 57 %), najmenšie Austrália a Európa (spolu 12 %, REKACEWICZ 2006). Distribúcia vody sa v priebehu roka mení, najmä v závislosti od zrážok a v dôsledku antropogénnej činnosti sa mení aj jej objem v jednotlivých zásobníkoch, napr. v dôsledku globálneho otepľovania a topenia ľadovcov sa zvyšuje podiel slanej vody.

Toto nerovnomerné rozdelenie podčiarkuje význam kolobehu vody pre život na Zemi. **Hydrologický cyklus** je biogeochemický cyklus, v ktorom voda prakticky neustále mení svoje skupenstvo, prostredníctvom zrážok sa distribuuje po zemskom povrchu, pričom sa obnovujú toky a zásobníky povrchovej a podpovrchovej vody, a súčasne sa prirodzenými mechanizmami čistí. Globálne množstvo vody ostáva stále, mení sa iba jej distribúcia a veľkosť tokov. (Vzhľadom k zásadnému významu vody pre život a pre existenciu, zdravie a prosperitu ľudskej spoločnosti sa hydrologickému cyklu venujeme podrobnejšie.)

Základné procesy hydrologického cyklu

Aj život na súši si vyžaduje vodu v podobe tečúcej alebo stojatej **povrchovej vody** plošného ronu, vodných tokov a vodných kanálov, jazier a umelých vodných nádrží, rybníkov a mokradí, ako aj podporvchovej vody – tú tvorí **pôdna vlaha** a **podzemné vody**, ktoré vypĺňajú prázdne priestory v sypkých a pórovitých horninách alebo pukliny v pevných horninách (napr. vo vápencoch a dolomitoch) pod zemským povrchom. Dopĺňajú sa infiltráciou vody pôdou a priepustnými horninami, pri vyvieraní na povrch sýtia aj povrchové vody. V porovnaní s povrchovými vodami je dostupných podzemných vôd zhruba 9 – 10 násobne viac a zabezpečujú pitnú vodu pre minimálne 50 % ľudskej populácie (WWAP 2015).

Keďže v dôsledku evapotranspirácie, odtoku vody po povrchu kontinentov a čerpania vody človekom by sa vodné zásoby rýchlo vyčerpali, voda musí byť pomerne intenzívne dopĺňaná zrážkami, ktoré prinášajú vetry smerujúce od oceánov na pevninu, ale tiež zrážkami, ktorých pôvod je vo výpare vody nad pevninou. Hydrológovia rozlišujú **veľký vodný cyklus** – výmenu vody medzi oceánmi a pevninou a **malý vodný cyklus**, v ktorom ide o výmenu vody iba nad pevninou alebo iba nad oceánmi. Hnacími motormi oboch cyklov sú tok slnečnej energie, gravitácia a pôsobenie bioty. Keďže vo vode sa rozpúšťa veľké množstvo látok, hydrologický cyklus je prepojený s ďalšími biogeochemickými cyklami.

Aké sú základné procesy hydrologického cyklu (napr. LEPEŠKA 2019)? Zohrievanie zemského povrchu slnečným žiarením vedie k jej **evaporácii**, t.j. k výparu z povrchu oceánov, jazier, nádrží, vodných tokov, mokradí a z pôdy a k horizontálnemu **transportu** vodnej pary, najmä od oceánov nad pevninu. Výpar zo snehu a ľadu sa označuje ako **sublimácia. Transpirácia** označuje fyziologický výpar – vyparovanie čistej vody z povrchu listov a stoniek. Keďže voda má menšiu molekulárnu hmotnosť ako hlavné zložky atmosféry dusík a kyslík, vodná para v ovzduší stúpa do výšky. S rastúcou výškou sa rozpína, ochladzuje a po dosiahnutí teploty rosného bodu **kondenzuje** a padá na zemský povrch v podobe **zrážok**.

Tie môžu mať podobu dažďa, snehu, ľadovca (krúpov) alebo námrazy. Z ročného objemu zrážok (približne 570 000 km^3) ich iba zhruba 20 % spadne na pevninu. Časť zrážok zachytia na svojom povrchu rastliny – **intercepcia** (táto voda nestečie na povrch pôdy, zväčša sa odparí). **Retencia** je schopnosť vegetácie zachytávať časť zrážkovej vody a postupne ju uvoľňovať, preto les, lúky a mokrade zmierňujú priebeh povodní tým, že spomaľujú záplavovú vlnu a znižujú jej amplitúdu. Časť zrážok padá vo forme snehu, ktorý sa na jar **topí** resp. vo vysokých polohách a v polárnych oblastiach sa **mení na ľad**, ktorý častočne sublimuje.

Zrážková voda pôsobením gravitácie **odteká** po zemskom povrchu najprv vo forme plošného **ronu**, neskôr vytvára **riečnu sieť:** bystriny, potoky, rieky a veľtoky, až sa v riečnych deltách **vlieva späť** do morí alebo do jazier. Časť zrážkovej vody **vsakuje** do pôdy, kde sa v nej rozpúšťajú živiny, ktoré spolu s vodou prijímajú rastliny. **Kapilárnym vzlínaním** sa táto voda dostáva až do listov rastlín, vrátane korún stromov. **Vsakovanie** do pôdy a priepustných hornín **(infiltrácia)**, pokračuje až po nepriepustnú horninu. Tento proces je dôležitý pre dopĺňanie pôdnej vlahy a zásob podzemnej vody v priepustných vrstvách a v puklinách hornín. Podzemná voda na vhodných miestach **vyviera** a odteká po zemskom povrchu.

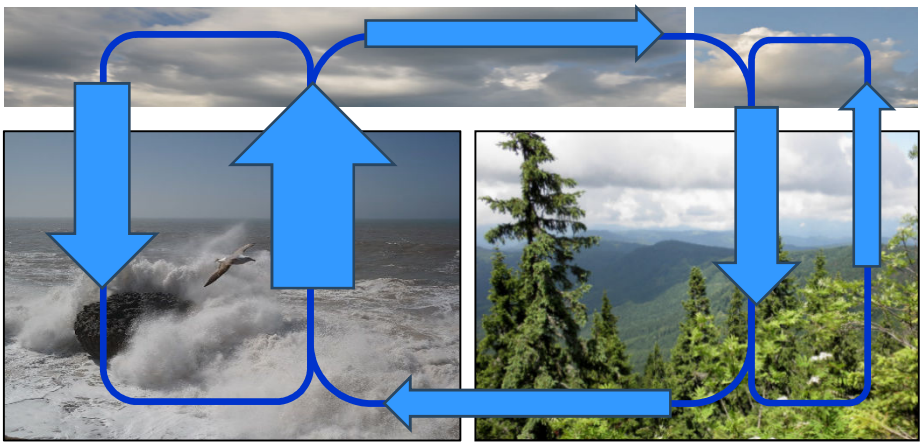
Teória biotickej vodnej pumpy

Veľký vodný cyklus medzi oceánom a pevninou berieme ako samozrejmosť. Avšak keď prvé organizmy začali osídlovať pevninu, táto bola vyprahnutou púšťou a daný cyklus v dnešnej podobe neexistoval. Ďalšia evolúcia života si vyžadovala nielen adaptáciu organizmov na suchozemské prostredie, ale tiež premenu abiotického prostredia súše na prostredie priaznivé pre život. Až osídlenie pevniny vegetáciou, najmä rozsiahlymi lesmi, zabezpečilo potrebný tok vody od oceánov do vnútrozemia kontinentov.

Makarieva & Gorshkov (2007, 2010) a ďalšie štúdie v rovine teoretickej fyziky dokazujú, že prísun vody z oceánu na súš do značnej miery súvisí s vegetačnou pokrývkou kontinentu. V dôsledku veľkého indexu listovej plochy prirodzené lesy vo vegetačnom období charakterizujú vysoké toky evaporácie a transpirácie, ktoré môžu prevýšiť výpar z rovnakej plochy povrchu oceánu. Vertikálny výstupný pohyb týchto tokov vedie ku kondenzácii vodnej pary a zrážkam. Podľa uvedených autorov sa pri kondenzácii znižuje atmosférický tlak nad danou oblasťou, čo má dva významné dôsledky:

1) Výškový gradient tlaku zintenzívňuje výstupné pohyby vzduchu, čím zosilňuje malý vodný cyklus nad pevninou.

2) Súčasne vzniká horizontálny gradient atmosférického tlaku, s oblasťou nižšieho tlaku nad pevninou a vyššieho nad oceánom, čo vedie k prísunu vody z oceánov nad pevninu (obr. 3.5).



Obr. 3.5. Teória biotickej pumpy prenosu vody z oceánov nad pevninu. Vo vegetačnom období lesy vzhľadom k veľkej listovej ploche odparia veľké množstvo vody a pri jej kondenzácii vznikajú oblasti nízkeho tlaku, do ktorých prúdi vzduch od oceánu. *Schéma:* © Peter Sabo, *námet podľa:* Makarieva & Gorshkov 2010. *Foto:* © Martin Sabo, Peter Sabo.

Hoci realita presunu vodných más nad pevninu je zložitejšia, túto teóriu ilustruje aj mechanizmus letného monzúnu v juhovýchodnej Ázii, kedy nad vyhriatou pevninou vzniká oblasť nízkeho tlaku vzduchu, ktorá ťahá vodu od oceánov. Kondenzácia vodnej pary nad pevninou oblasť nízkeho tlaku ďalej posilňuje a tým udržiava letný prísun vlhkého vzduchu od oceánu. Keďže tento horizontálny ťah vody nad pevninu je podľa uvedenej teórie indukovaný vegetáciou, najmä rozsiahlymi lesmi, Makarieva & Gorshkov (2007) ho nazvali

„biotická pumpa atmosférickej vlhkosti“. V prípade, ak by sa ich teória potvrdila, to znamená, že rozsiahle výruby lesov (od úsvitu priemyselnej revolúcie naša planéta prišla viac ako o polovicu lesnej pokrývky a v posledných desaťročiach sa odlesňovanie sústreďuje najmä na tropické pralesy) nevedú iba k úbytku biodiverzity a k zosilneniu skleníkového efektu, ale môžu tiež viesť k dezertifikácii rozsiahlych oblastí.

Antropogénne narušenie hydrologického cyklu a jeho následky

Voda je obnoviteľný prírodný zdroj. Ak však rýchlosť jej spotreby prevyšuje možnosti dopĺňania vody v jej prirodzených zásobníkoch alebo ak jej znečisťovanie prevyšuje možnosti samočistenia, je to zdroj vyčerpateľný a degradovateľný. K hlavným procesom narušenia vodného cyklu patrí (upravené podľa MILLER 2005):

1) **Vyčerpávanie vodných zdrojov**. V 20. storočí vzrástla spotreba vody 6 násobne a za posledných 50 rokov 3 násobne (UNEP 2002, 2012). Čerpanie podzemnej vody sa v období 1960 – 2000 zvýšilo z 312 km^3 na 982 km^3 ročne, pričom 20 % zdrojov sa využíva intenzívnejšie ako sú schopné obnovy (WWAP 2015; UNEP 2019). Najviac vody sa využíva na zavlažovanie plodín (v priemere 70 %), v priemysle (20 %) a v domácnostiach (10 %). Medzi štátmi sú však značné rozdiely, napr. bohatý Sever míňa menej vody na závlahy a oveľa viac na energetiku a priemysel (v Európskej únii sa na závlahy spotrebúva 50 % čerpanej vody, na priemysel 18 %, domácnosti 12 % a zvyšok na produkciu energie, EEA 2014). Na Slovensku sa na závlahy využívajú asi 3 %, priemysel spotrebuje asi 85 % vody, zvyšok domácnosti.

   Na začiatku 21. storočia mali najvyššiu vodnú ekologickú stopu USA, 2 798 m^3 ročnej spotreby vody na osobu, kým v Ázii a v Pacifiku to bolo iba 1 156 m^3 a globálny priemer bol 1 387 m^3 (UNEP 2012). S rastom ľudskej populácie a nárokov hospodárskych sektorov na vodu sa jej priemerná dostupnosť znižuje. Ak priemerná dostupnosť vody na osobu ročne je nižšia ako 1 700 m^3 nastáva **vodný stres**, ak je nižšia ako 1 000 m^3 nastáva **núdza o vodu** (UNEP 2002). **Nedostatku vody** dnes čelia cca 3,4 miliardy ľudí, avšak analýzy trendov dostupnosti sladkej vody, zohľadňujúce rast obyvateľstva a spotreby, zmenu krajiny aj zmenu klímy hovoria, že v budúcnosti bude nedostatku vody pravdepodobne čeliť až 5 miliárd ľudí, pričom v dôsledku zvyšovania rizík nástupu dlhotrvajúceho sucha nie sú vylúčené ani hrozby hladomorov (UNEP 2012, 2019; RODELL et al. 2018).

2) **Znižovanie retenčnej a infiltračnej kapacity krajiny.** Znižovanie retenčnej kapacity spočíva najmä v odlesňovaní, rozorávaní lúk a pasienkov, odstraňovaní drevinovej vegetácie v oráčinovej krajine a v likvidácií brehových porastov a mokradí, ktoré všetky dokážu zadržiavať značné množstvá zrážok, spomaľovať tým odtok vody a zmierňovať účinky povodní. Tropické pralesy patria medzi najviac ničené ekosystémy Zeme, dnes zaberajú menej ako polovicu ich pôvodnej rozlohy. Z pôvodných mokradí od roku 1700 ostalo ešte menej, iba 13 % (IPBES 2019). K zníženiu infiltrácie a k zrýchleniu odtoku vody prispieva najmä rastúca urbanizácia a budovanie cestnej siete – rozširovanie nevsiakavých povrchov, ale aj používanie ťažkej mechanizácie na poliach vedúce k zhutňovaniu pôdy.

3) **Globálna zmena klímy.** Človekom vyvolaná súčasná klimatická zmena vedie k zohrievaniu povrchu oceánov a kontinentov, k vyššej evaporácii a k zmene intenzity, frekvencie a rozloženia zrážok na zemskom povrchu. V konečnom dôsledku to vedie k zrýchľovaniu vodného cyklu a k nárastu víchric, povodní, dlhotrvajúceho sucha a pod. Napr. v období 1980-2000 sa globálne zvýšil počet povodní o 230 % a katastrof spôsobených suchom o 38 % (UNEP 2012). BLÖSCHL et al. (2020) preukázali, že posledné tri desaťročia patria k najbohatším obdobiam na povodne za 500 rokov, pričom oproti minulosti väčšina povodní prichádza v lete. Aj v strednej Európe sa v posledných desaťročiach zvyšuje výskyt prívalových dažďov, čo v synergii so znižovaním retenčnej kapacity krajiny zvyšuje riziko a intenzitu povodní. Dlhotrvajúce suchá zas ohrozujú sladkovodné ekosystémy a oslabujú ich ekosystémové služby. Z Afriky je známy prípad Čadského jazera, ktoré v dôsledku synergie zmeny klímy a vysokého čerpania vody na závlahy za polstoročie stratilo až 90 % svojej pôvodnej rozlohy. **Dezertifikáci**a spojená s vysúšaním krajiny je rastúcim problémom najmä v subsaharskej Afrike (UNEP 2019).

   Iným problémom je roztápanie vysokohorských ľadovcov. Napr. desať veľkých ázijských riek (vrátane Gangy, Indu, Mekongu, Jang-ce), ktorých povodia zabezpečujú vodu pre 20 % svetovej populácie, je

závislých od vody z topiaceho sa ľadu v Himalájach a himalájske ľadovce tiež ustupujú. Podobnú funkciu majú pre zásobovanie obyvateľstva vodou aj ľadovce v Andách aj v európskych Alpách.

4) K narušeniam hydrologického cyklu patrí aj **znečisťovanie vody**, ktoré ohrozuje zdroje pitnej vody a ktorého intenzita v mnohých vodných tokoch prevyšuje ich kapacitu samočistenia. K hlavným skupinám vodu znečisťujúcich látok patria patogénne mikroorganizmy, organické odpady, ktorých rozklad znižuje obsah kyslíka vo vode (napr. hnojovica, močovka), sedimenty a živiny, okysľujúce látky, ťažké kovy a soli, toxické perzistentné organické polutanty a v niektorých oblastiach aj rádioaktívne a tepelné znečistenie. K novým znečisťujúcim látkam patria antibiotiká, repelenty, dezinfekčné prostriedky, oneskorovače horenia, detergenty, mikroplasty a nanomateriály. Nebezpečné sú najmä mikropolutanty, syntetické chemické látky toxické už pri nízkych koncentráciách (SCHWARZENBACH et al. 2006). Na choroby spojené so znečisťovaním vody patogénami každoročne umiera 1,4 milióna ľudí (UNEP 2019).

Silné narušenie vodného cyklu vedie k **nepriaznivým vplyvom na ekosystémy**, produkciu potravín, ľudské zdravie aj na klimatický systém. V tomto kontexte je zarážajúce, že iba asi 15 % publikovaných diagramov vodného cyklu uvažuje aj s jeho antropogénnym narušeniami (ABBOTT et al. 2019), čo sa nepriaznivo premieta do ovplyvňovania postojov politikov a úradníkov, ale aj odbornej aj laickej verejnosti, pretože dnes už nestačí rozumieť iba pôvodnému prírodnému vodnému cyklu.

Systémový prístup a akceptovanie zložitosti sú však nevyhnutné, ak máme zvýšiť **efektívnosť využívania vody** v jednotlivých sektoroch, **recyklovať používanú vodu** (najmä v priemysle, energetike a v domácnostiach), **zachytávať zrážkovú vodu** (najmä v urbánnom prostredí, aby neodtekala do kanálov), odsoľovať morskú vodu (v pobrežných krajinách), a dôsledne **regulovať čerpanie vody** a **monitorovať a zamedziť jej znečisťovaniu**. ROCKSTRÖM et al. (2009) tvrdia, že napr. pre zabránenie vysúšaniu krajiny (čo v dôsledku zmeny klímy hrozí aj Slovensku) potrebujeme udržať 90 % pôdnej vlhkosti a zachovať 20 – 50% objemu povrchovej vody vo vodných ekosystémoch ako minimum pre ich fungovanie.

3.2.2 Cyklus uhlíka a jeho narušenie

Uhlík je základným stavebným kameňom väčšiny organických zlúčenín a má kľúčovú úlohu pri transformáciách energie. **Cyklus uhlíka** je kolobeh uhlíka v podobe rôznych chemických zlúčenín medzi jeho abiotickými a biotickými zásobníkmi. Popri vodnom cykle je rovnako významným biogeochemickým cyklom, má mimoriadny význam tak pre živé organizmy, ako aj pre klimatický systém Zeme (obr. 3.6).

Zásobníky uhlíka (zoradené podľa jeho rastúceho obsahu)

Atmosféra: v roku 2011 sa v nej podľa správy IPOCC 2013b nachádzalo cca 830 GtC (gigaton uhlíka, 1 Gt = 10^9 ton), z toho až 240 GtC pribudlo až po rokku 1750. Uhlík sa tu nachádza vo viacerých zlúčeninách, najmä ako oxid uhličitý (CO_2) a metán (CH_4), ktorého molekula má 25 násobne silnejší zohrievací efekt ako molekula CO_2 (našťastie v atmosfére zotrváva iba krátku dobu). Metán vzniká pôsobením mikroorganizmov pri aneróbnom rozklade organickej hmoty, napr. v mokradiach. Je hlavnou zložkou zemného plynu, uvoľňuje sa i zo skládok odpadov. Vzniká aj pri fermentačných procesoch v zažívacom trakte veľkých bylinožravcov, nachádza sa tiež v termitiskách, v oceánoch a permafroste, z ktorého sa pri roztápaní už dnes vo veľkom uvoľňuje. Keďže CO_2 aj CH_4 sú po vodnej pare najvýznamnejšie skleníkové plyny, aj malé zmeny ich koncentrácie v atmosfére majú zásadné dopady na klímu.

Živé organizmy: v živých organizmoch, najmä vo vegetácii, je viazaných 450 až 650 Gt C.

Pôda: v pôde sa viaže ďalších 1500 až 2400 Gt C.

Oceány: viažu uhlík jako vo vode rozpustený CO_2 a v morskej biote, tu je najmä vo forme uhličitanu vápenatého ($CaCO_3$), ktorý tvorí schránky morských mäkkýšov, ale aj pevné časti fyto- a zooplanktónu. Oceánsky zásobník pozostáva z dvoch častí: v povrchových vodách v hĺbkach do 200 m je viazaných 900 Gt C, v strednom a hlbokom oceáne je to 38 000 Gt C a v sedimentoch na oceánskom dne 1 750 Gt C.

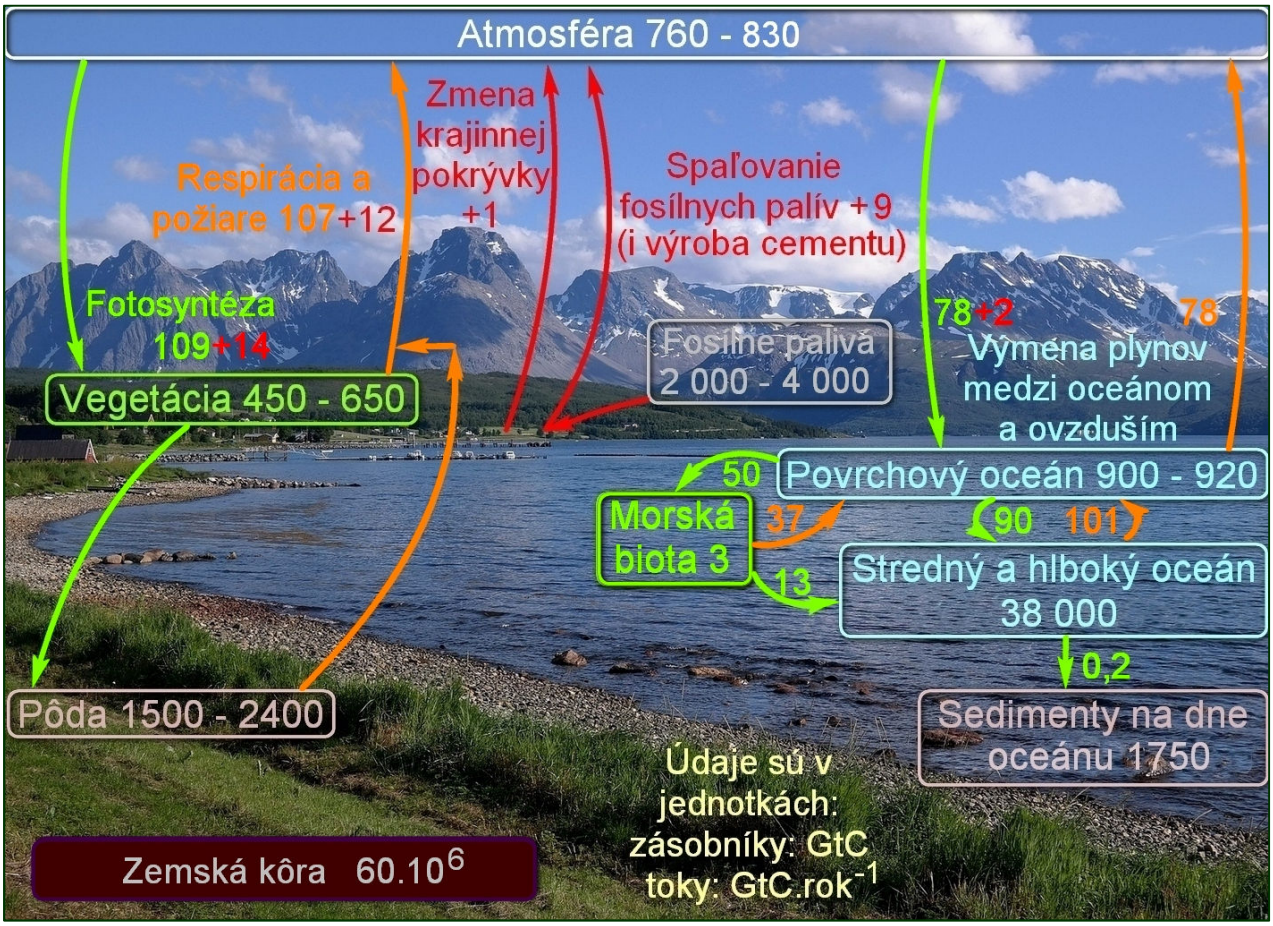
Zemská kôra: od 60 do 100 miliónov Gt, z toho 2 000 až 10 000 Gt vo fosílnych palivách.

Zdroj: HOUGHTON 1998; DENMAN et al. 2007; US DEPT. OF ENERGY 2008; IPCC 2013; CAIN et al. 2014

Uhlík prechádza medzi jeho menšími zásobníkmi v atmosfére, biote a pôde pomerne rýchlo, zväčša v priebehu týždňov, rokov až desaťročí, podstatne pomalšie v oceánoch a vo veľmi dlhom geologickom cykle trvá vrásnenie sedimentárnych hornín v zemskej kôre, v ktorých je uhlík viazaný vo forme $CaCO_3$.

Základné procesy cyklu uhlíka

V atmosfére je životnosť uhlíka iba niekoľko rokov. Atmosférický CO_2 sa rozpúšťa v zrážkovej a povrchovej vode (v sladkej aj v morskej). Z atmosféry aj z vody je odbúravaný **fotosyntézou**, pri ktorej sa zabuduje do organických zlúčenín rastlín a rias. Naopak, pri **dýchaní (respirácii)** organizmov alebo pri spaľovaní organickej hmoty sa uhlík vo forme CO_2 vracia do atmosféry. Aj baktérie **rozkladajúce detrit** spôsobujú, že uhlík sa vracia do atmosféry vo forme CO_2. Veľkosť uhlíka uvoľneného pri rozklade orga nickej hmoty je pritom značná, na pevnine sa zhruba vyrovná respirácii rastlín, húb a živočíchov. V oceánoch sa uhlík nachádza **rozpustený vo vode** a v **morskej biote**. Časť vo vode rozpusteného CO_2 je transportovaná do hlbokých vôd (z nich sa dostáva až studenými výstupnými prúdmi). CO_2 **odbúravaný fotosyntézou** je zabudovaný do pletív fytoplanktónu, rias a makrofytov (obr. 3.6).



Obr. 3.6. Globálny cyklus uhlíka. Graf ilustruje hlavné zásobníky a toky uhlíka v miliardách ton (Gt) ročne. Zelenou farbou sú označené prirodzené toky, ktoré ho odbúravajú z atmosféry, oranžovou prirodzené toky, ktoré ho vracajú do atmosféry a červenou antropogénne toky a zmeny prirodzených tokov spôsoberé spaľovaním fosílnych palív a výrobou cementu, ako aj zmenou krajiny (najmä odlesňovaním). Ilustrácia je zjednodušená, nie je tu napr. zachytený tok uhlíka zo sopečnej činnosti, ani zo zvetrávania hornín; tiež uvádzané hodnoty sú oproti podrobnejším ilustráciám v správe IPCC (2013) a v práci CAIN et al. (2014) (z ktorých sú v podstatnej miere prevzaté), zaokrúhlené. *Schéma:* (c) Peter Sabo, *Námet a údaje:* US DEPT. OF ENERGY 2008; THE UNIVERSITY OF NEW HAMPSHIRE 2008; IPCC 2013; CAIN et al. 2014. *Foto:* © Martin Sabo, 2020 (oblasť Troms og Finnmark v Nórsku).

Živočichy ho získavajú konzumáciou potravy. Uhličitan vápenatý ($CaCO_3$) spevňuje telá fytoplanktónu aj mnohých živočíchov, mäkkýše si z neho vytvárajú vonkajšie **aragonitové schránky**. Po odumretí organizmov detrit a schránky klesajú do hĺbok a na dno oceánu, kde vrstvy ich **sedimentov** obrovský tlak vody

zlisuje. Nakoľko tento proces na dlho vyraďuje uhlík z obehu, nazýva sa aj oceánska biologická pumpa. Následným zdvihnutím a vrásnením hornín z niekdajšieho morského dna vznikli aj všetky naše vápencové krasové pohoria. Uhlík viazaný v horninách sa vracia do atmosféry až v procesoch **zvetrávania.**

Veľké množstvo C sa uvoľňuje tiež pri **sopečnej činnosti.** Ak sa medzi vrstvami sedimentov nachádzala odumretá organická hmota a baktérie, pôsobením vysokého tlaku a teploty sa v priebehu miliónov rokov premenili na uhlie, ropu a zemný plyn – **fosílne palivá**, zásadný energetický pohon našej civilizácie. Hoci tok uhlíka medzi atmosférou a pevninou je vyšší ako jeho tok medzi atmosférou a oceánmi, oceánska biologická pumpa na veľmi dlhé obdobia odbúrava viac uhlíka ako je tomu na pevnine.

Výskumom obsahu CO_2 zachyteného vo vzduchových bublinách v antarktickom ľade sa zistila korelácia medzi zmenami koncentrácie CO_2 v atmosfére a zmenami teploty zemského povrchu, v dôsledku čoho sa zmeny koncentrácie CO považujú za jednu z hlavných príčin striedania dôb ľadových a medziľadových. Zrejme sa na ňom podieľa synergiické pôsobenie viacerých faktorov – teploty, zmien atmosférickej cirkulácie, morských prúdov a zmien primárnej produktivity (MAHOWALD 2013).

Narušenie prirodzeného obehu uhlíka

Vrty v ľadovej pokrývke Antarktídy a výskum CO_2 zachyteného vo vzduchových bublinkách v ľade potvrdili, že niekoľko tisíc rokov pred začiatkom priemyslovej revolúcie bola jeho koncentrácia v atmosfére relatívne stála, pohybovala sa okolo 280 ppm. Priemerná koncentrácia CO_2 v decembri 2019 bola už 411,85 ppm (t.j. 0,0412 % CO_2 v atmosfére), čo je oproti stavu pred priemyselnou revolúciou nárast o 47 %. Hlavné skupiny procesov, ktorými človek narušil prirodzený cyklus uhlíka sú predovšetkým:

1) **Ťažba a spaľovanie fosílnych palív.** Globálne emisie uhlíka sa za púhych 115 rokov – od roku 1900 do roku 2015 zvýšili z 2 Gt na 36 Gt ročne (RITCHIE & ROSER 2018) – hlavným zdrojom je spaľovanie fosílnych palív v energetike, doprave, priemysle, poľnohospodárstve a produkcia cementu (UNEP 2012). Na tomto trende sa podieľajú predovšetkým priemyselne vyspelé krajiny, v súčasnosti už aj Čína (30 % priamych globálnych emisií CO_2), nasledovaná USA (16 %), EÚ (11 %), Indiou (6 %) a Ruskom (5 %) – OLIVIER et al. (2014). Ťažba fosílnych palív, úniky z plynovodov a ropovodov zvyšujú aj koncentráciu CH_4.

2) **Znižovanie kapacity krajiny a jej ekosystémov absorbovať CO_2**. Absorbérom CO_2 je najmä vegetácia. Kľúčové sú lesy (najmä pralesy), travinné porasty, rašeliniská, rieky, jazerá a mokrade, aj oceány. Primárna produktivita oceánov je nízka, ale v dôsledku ich obrovskej rozlohy je ich podiel zásadný. V súčasnosti je kritický najmä vplyv odlesňovania, ktorého tempo v období 2000 – 2010 bolo zhruba 13 mil. ha ročne (UNEP 2012). Najrýchlejšie je odlesňovanie tropických pralesov (IPBES 2019), najmä v Južnej Amerike a Afrike. Odhaduje sa, že samotné odlesňovanie má asi 20 % podiel na emisiách CO_2 (SIMPSON 2007).

3) **Poľnohospodárska výroba.** Emisie metánu sa výrazne zvýšili v dôsledku rastu produkcie ryže, osobitne premenou rozsiahlych plôch na zavlažované ryžové polia (najmä v Ázii),v ktorých dochádza k prirodzenej tvorbe metánu. S rastom konzumu je spojený aj nárast spotreby mäsa a mlieka, ktorý viedol k rozvoju veľkochovov hovädzieho dobytka. V jeho zažívacom trakte vzniká CH_4 fermentáciou. V menšej miere metán uniká z komunálnej kanalizácie a skládok odpadu a pri pálení biomasy.

Súčasná zmena klímy ako následok narušenia prirodzeného obehu uhlíka

Narušenie cyklu uhlíka vedie k zosilneniu skleníkového efektu. Rýchly rast emisií skleníkových plynov a likvidácia pralesov môžu viesť k zdvojnásobeniu predindustriálnej koncentrácie CO_2 do polovice 21. storočia, s dramatickými dôsledkami na biodiverzitu, ekosystémy a ľudí (HANSEN 2009; IPCC 2013, 2014; EEA 2012,2017). Zvyšovanie koncentrácie CO_2 v ovzduší síce zvyšuje efektívnosť fotosyntézy a tým aj primárnu produktivitu biomasy, avšak zmena klímy znamená aj výrazné zmeny rozloženia, frekvencie a intenzity zrážok, preto aj poľnohospodársku a lesnú produkciu a zásobovanie vodou bude na mnohých miestach obmedzovať nedostatok vlahy, dlhé obdobia sucha a nestabilita klímy. (Okrem antropogénneho narušenia cyklov uhlíka a vody sú známe aj prirodzené procesy vedúce ku klimatickým zmenám, napr. Milankovičove cykly, sopečná činnosť, pády meteoritov, pohyby pevninských dosiek, zmeny morských prúdov, atď.)

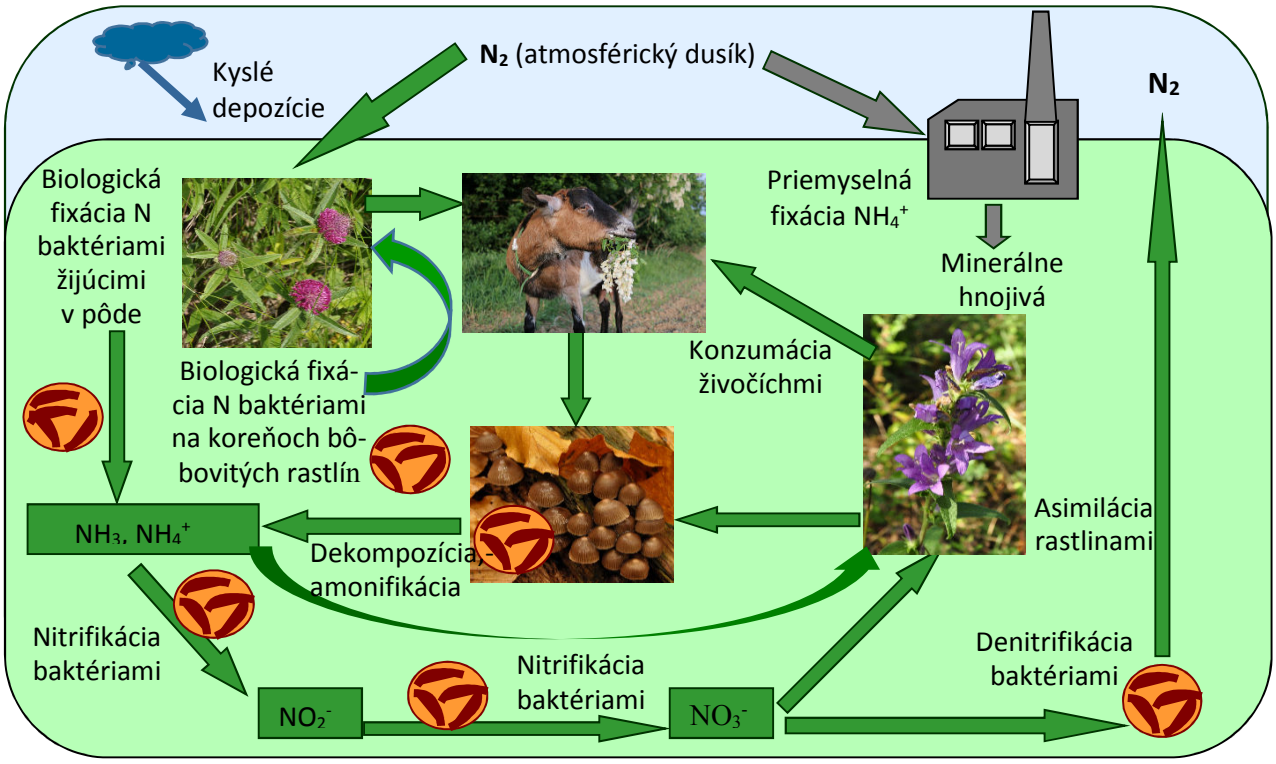
Príčinám a následkom zmeny klímy na zložky životného prostredia a ľudské zdravie sa podrobne venujú napr. správy Medzivládneho panelu pre zmenu klímy (IPCC, *Intergovernmental Panel for Climate Change*), Programu OSN pre životné prostredie (UNEP, *United Nations Environment Programme*), Európskej environmentálnej agentúry (EEA, *European Environment Agency*) a tiež správy početných mimovládnych organizácií. Napriek tomu pri riešení tohoto problému často **absentuje systémový prístup**, čo dokladujú napr. iracionálne dotácie na biopalivá alebo podceňovanie vplyvov výstavby obnoviteľných zdrojov energie na životné prostredie (napr. malé vodné elektrárne, solárne elektrárne na lúkach a pod.)

3.2.3 Cykly dusíka, fosforu a síry a ich narušenie

Cyklus dusíka

Dusík je významným prvkom mnohých organických zlúčenín (najmä proteínov, vitamínov, aminokyselín a nukleových kyselín) a jeho nedostatok je limitujúcim ekologickým faktorom rastu rastlín. Vo forme molekúl N_2 je najhojnejším plynom v atmosfére (koncentrácia 78 %), v tejto forme je však pomerne inertný a rastliny ho nedokážu využiť. K známym anorganickým zlúčeninám patrí oxid dusný (N_2O), oxid dusnatý (NO) či dusičitý (NO_2). Okrem organizmov sa dusík vo forme organických zlúčenín nachádza v pôde, vode a sedimentoch, najmä v detrite a v humuse vo forme dusík obsahujúcich iónov zlúčenín (amóniových iónov (NH_4^+), dusitanových (NO_2^-) a dusičnanových (nitrátových, NO_3^-). V pôde a vode je jeho celková hmotnosť zhruba o 4 rády nižšia ako v atmosfére a v biote dokonca až o 5 rádov.

Prvým krokom cyklu je **fixácia atmosférického dusíka**, v malej miere bleskami, v podstatnej symbiotickými nitrogénnymi baktériami, ktoré žijú v zhlukoch na koreňoch bôbovitých rastlín, ako aj amonizačnými baktériami voľne žijúcimi v pôde. Fixáciou dusíka vzniká amoniak (NH_3), ktorý sa rozpúšťa vo vode, pričom vznikajú amónne katióny NH_4^+, ktoré už môžu rastliny využiť. Prevažná časť katiónov NH_4^+ sa ale pôsobením nitrifikačných baktérií **v procese nitrifikácie** oxiduje najprv na dusitany NO_2^- (toxické pre rastliny) a v druhom kroku na na dusičnany NO_3^- (tie už môžu rastliny využiť). (Obr. 3.7)



Obr. 3.7. Cyklus dusíka. Z priestorových dôvodov tu ilustrujeme iba dve narušenia tohto cyklu: kyslé atmoférické depozície a priemyselná fixácia atmosférického dusíka na NH_4 pri výrobe minerálnych hnojív. *Schéma:* © Peter Sabo, *námet podľa:* U.S. Environmental Protection Agency (Public Domain) a BEDNAREK et al. 2014, *Foto*: © Michaela Murková, Peter Sabo.

Rastliny absorbujú dusík v procese **asimilácie** vo forme amónnych a nitrátových iónov. **Živočíchy** ho získavajú konzumáciou rastlín. Dusík prítomný vo výkaloch a v odumretej organickej hmote vstupuje do detritového potravného reťazca. V ňom sú dusíkaté zlúčeniny zdrojom potravy **rozkladačov**, najmä baktérií, ktoré ich v procese **amonifikácie** mineralizujú späť na amoniak NH_3 a amónne katióny NH_4^+. Tieto ióny môžu rastliny znovu využívať alebo ich **procesy nitrifikácie** konvertujú na nitrátové ióny NO_3^-. Ak ióny NO_3^- nie sú využité rastlinami môžu byť **procesmi denitrifikácie** konvertované anaeróbnymi baktériami na plynný dusík (N_2), oxid dusný (N_2O) a uvoľňované späť do atmosféry.

Narušenie prirodzeného obehu dusíka a jeho dôsledky

Ľudské aktivity narúšajú cyklus dusíka viacerými formami a spôsobmi, medzi najvýznamnejšie z nich patria nasledovné (*upravené podľa* ROCKSTRÖM et al. 2009; MILLER & SPOOLMAN 2011):

1) **Spaľovanie fosílnych palív** pri vysokých teplotách vedie k emisiám oxidu dusnatého (NO), ktorý sa mení na oxid dusičitý (NO_2). Ten sa môže prenášať na veľké vzdialenosti a jeho reakciou so vzdušnou vlhkosťou vzniká kyselina dusičná (HNO_3). Výsledkom sú **kyslé atmosférické depozície**, ktoré najmä vo forme kyslých dažďov od 70. rokov 20. storočia poškodzujú lesy a jazerá severnej pologule. (Tu treba uviesť, že na týchto depozíciách sa výrazne podieľajú aj oxidy síry.) Nepriaznivý vplyv na lesy nastáva už pri $pH < 4$, fytoplanktón v jazerách ubúda už pri $pH < 5$. Spaľovaním fosílnych palív sa ročne fixuje cca 20 miliónov ton dusíka, spaľovaním biomasy ďalších 10 miliónov ton. Lepšie technológie v Severnej Amerike a v Európe viedli k zníženiu produkcie prekurzorov kyslých depozícií, čo sa prejavilo v zotavovaní jazier v Škandinávii aj na Slovensku (BITUŠÍK 2006).

2) **Odoberanie dusíka z pôdy** vo forme poľnohospodárskych plodín si vynútilo aj jeho navracanie do pôdy, tradične predovšetkým vo forme maštaľného hnoja (a jeho rozkladu) a pestovania ďateľovín (fixovanie dusíka z atmosféry nitrogénnymi baktériami). Po objave syntézy amoniaku pri vysokých teplotách a tlaku ($N_2 + 3\ H_2 \rightarrow 2\ NH_3$) sa situácia zmenila. Podľa ROCKSTRÖMA et al. (2009) celková fixácia dusíka do pôdy dnes niekoľkonásobne prevyšuje jeho prirodzenú fixáciu terestrickými ekosystémami.

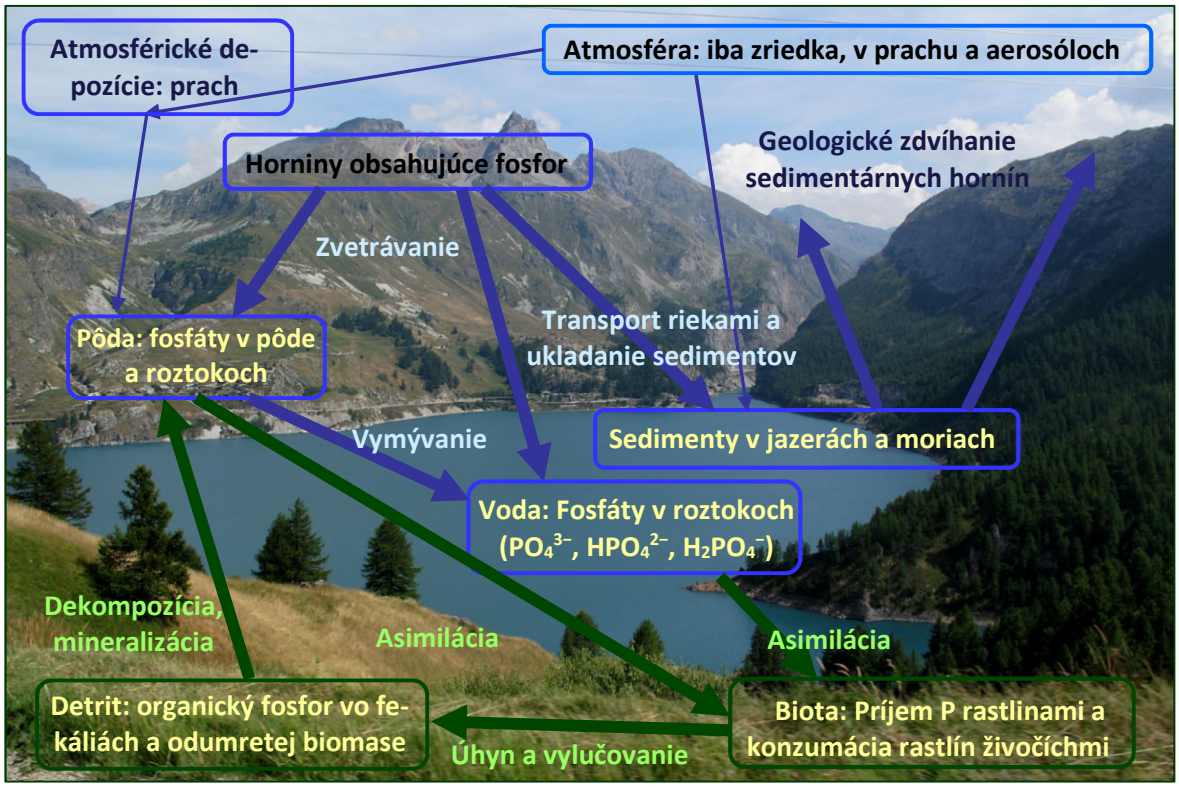
3) Túto zvýšenú fixáciu dusíka čiastočne kompenzuje narušenie cyklu v inom smere, kedy sa veľké **množstvá dusíka vracajú do atmosféry** v dôsledku likvidácie lesných, travinných a mokradných ekosystémov pri ich rozklade hubami a baktériami. Ako vedľajší produkt fixačných a denitrifikačných procesov sa do atmosféry uvoľňuje aj ďalší významný skleníkový plyn, oxid dusný (N_2O). Jeho priemerná životnosť je vyše 70 – 100 rokov a zohrievací potenciál jeho molekuly je oproti CO_2 zhruba 300-krát vyšší (IPCC 2013).

4) Amoniak a nitrátové soli sú ľahko rozpustné vo vode, dažde ich splachujú z polí do povrchových aj podzemných vôd. Tento zvýšený prísun živín, tzv. **kultúrna eutrofizácia** vedie k prudkému nárastu porastov rias a siníc na vodnej hladine, ktorý vytláča iné planktónne druhy. Rozvoj rias a siníc vedie k rozvoju zooplanktónu a po ich odumretí k veľkému objemu detritu hromadiaceho sa na dne. Pri jeho rozklade sa výrazne zvyšuje spotreba kyslíka a zakalenie vody, čo nepriaznivo vplýva na živočíchy, hlavne ryby, ale aj vodné bezstavovce. Eutrofizácia postihuje stojaté a pomaly tečúce vody, delty riek, ale aj plytké moria, v ktorých vytvára **mŕtve zóny** s nedostatkom kyslíka (SELMAN & GREENHALG 2002). V menšej miere eutrofizácia v podobe vysokého prísunu živín do pôdy postihuje aj terestrické ekosystémy, z prírodných ekosystémov ohrozuje napr. vresoviská alebo druhovo pestré lúky.

Cyklus fosforu

Ďalšou významnou živinou je fosfor (P), dôležitá zložka nukleových kyselín, ale tiež kľúčového „energonosiča“, makromolekuly ATP (adenozíntrifosfát). Nedostatok fosforu, ktorého je v horninách a v pôde málo, môže limitovať rast rastlín, aj keď ho potrebujú v podstatne menšej miere ako dusík. Na rozdiel od predošlých cyklov fosfor obieha iba medzi pevninou, oceánmi a biotou a jeho obeh je pomalší. V atmosfére sa nachádza iba vo veľmi nízkych koncentráciách ako súčasť zvíreného prachu alebo aerosolov. Najväčšími rezervoármi fosforu sú horniny a oceánske sedimenty. Z hornín sa fosfor prostredníctvom **zvetrávania a vodnej erózie** dostáva vo forme fosforečnanov do pôdy a vody. Fosfátové ióny PO_4^{3-} môžu by už priamo **absorbované koreňmi rastlín**. Fosfor následne prechádza **potravovými (trofickými) reťazcami**

a z odumretej organickej hmoty a z fekálií ho **rozkladače vracajú** späť do pôdy a vody. Z pôdy môže byť vymývaný silnými dažďami a vodnými tokmi sa dostáva do jazier, morí a oceánov, kde sa **ukladá v sedimentoch.** Tým je na veľmi dlhú dobu vyradený z obehu. Podobne ako v prípade uhlíka aj fosfor sa vracia na začiatok cyklu až v priebehu veľmi dlhých geologických epoch, počas ktorých dochádza k vyzdvihnutiu sedimentárnych hornín nad úroveň hladiny morí a príp. k vrásneniu hornín (obr. 3.8).



Obr. 3.8. Cyklus fosforu. Atmosféra nie je rezervoárom fosforu, nachádza sa v nej iba vo forme zvíreného prachu a iných aerosólov. *Schéma:* © Peter Sabo. *Foto:* © Tomáš Páleník, 2009.

Diaľkový transfer fosforu zo Sahary do Amazónie

K špecifikám cyklu fosforu patrí **diaľkový transfer fosforu** a iných minerálov, obsiahnutých v piesku Sahary. Tento piesok dvíhajú do výšky prachové búrky na Sahare a silné vetry ich, najmä v období kedy na severnej pologuli panuje zima, transportujú na západ, až do amazonských pralesov. Tropické dažďové pralesy Amazónie sú mimoriadne bohaté na biomasu a na biodiverzitu, avšak silné dažde vo veľkom vymývajú živiny z pôdy, vrátane fosforu, ktorý sa tu stráca vysokým tempom.

Satelitnými meraniami sondy Calipso v období 2007 až 2013 sa zistilo, že silné vetry v priemere ročne odvejú zo Sahary 182 miliónov ton prachu, z ktorých 27 miliónov dosiahne až nížiny Amazónie, čo znamená v priemere každoročný prísun 22 000 ton fosforu, zhruba toľko, koľko ho ročne z pôdy vymyjú silné zrážky. To je pre zachovania Amazonských tropických pralesov veľmi významné.

Zdroj: Mahowald et al. 2014; Yu et al. 2015

Narušenie cyklu fosforu človekom

Človek narušil cyklus fosforu najmä nasledovnými spôsobmi (*upravené podľa* Mahowald 2013):

1) Fosfor sa vo veľkom ťaží zo sedimentárnych hornín, v ktorých je uložený najmä vo forme skamenelín alebo guána (za dlhé časové obdobie nahromadených exkrementov, najmä morských vtákov). Najmä pre účely produkcie minerálnych hnojív sa ročne vyťaží približne 20 miliónov ton fosforu.
2) Tým, že sa zvýšil prísun fosforu do poľnohospodárskej pôdy vo forme minerálnych aj organických hnojív, zvýšilo sa aj jeho vymývanie z pôdy. Podľa Rockström et al. (2009) sa každoročne asi 10,5 miliónov

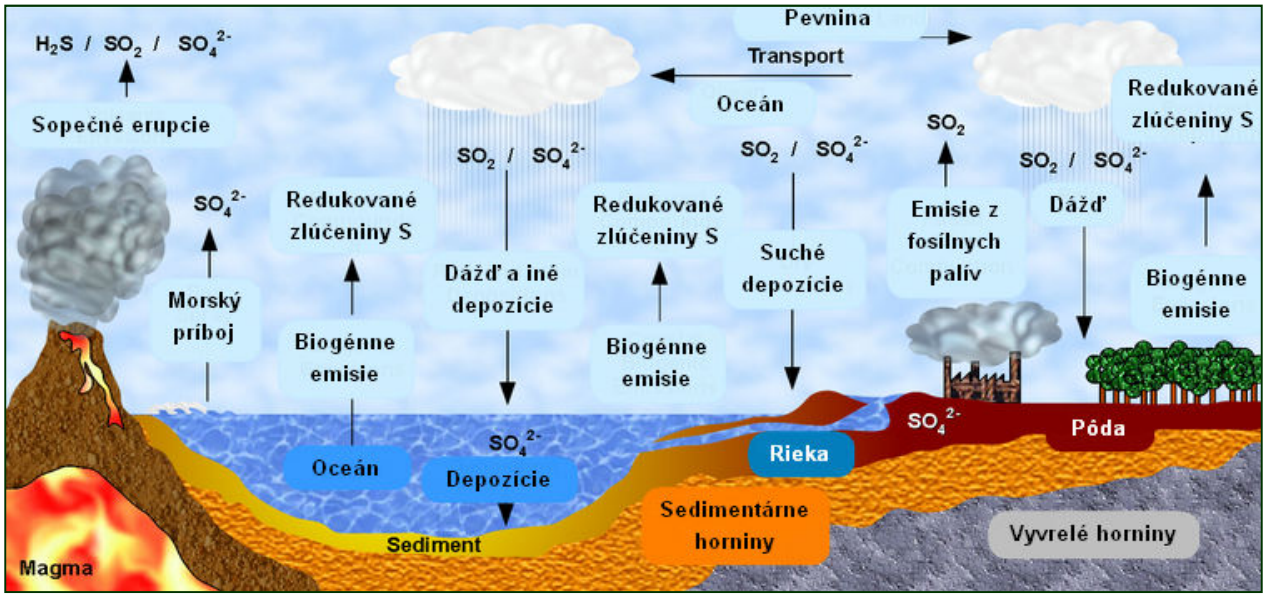
ton splaví z polí do vodných tokov a končí v oceánoch. Prísun fosforu do oceánov oproti prírodným tokom človek zvýšil asi o 20 %. Splachy fosforu z polí a z odpadových vôd (spolu so splachmi dusíka) prispievajú ku **kultúrnej eutrofizácii** sladkovodných aj morských ekosystémov.

Cyklus síry

Síra je dôležitým biogénnym prvkom (je zložkou proteínov, spojivových tkanív a mikroorganizmov). Jej najväčším rezervoárom sú horniny a oceánske sedimenty, významné sú aj toky síry do atmosféry. Nižšie uvádzame zjednodušený opis cyklu síry (*upravené podľa* MILLER 2011; MAHOWALD 2013):

K prírodným procesom, ktorými sa **síra dostáva do atmosféry** patria najmä lesné požiare, ktoré sú zdrojmi emisií oxidov síry, najmä oxidu siričitého (SO_2), ktorý sa v atmosfére v priebehu niekoľkých dní oxiduje na SO_3 a silne hydrofilné sírne aerosoly (SO_4^{2-}). Reakciou SO_3 so vzdušnou vlhkosťou vzniká kyselina sírová H_2SO_4. Ďalej sa síra do atmosféry dostáva sopečnou činnosťou (vo forme SO_2, aerosolov SO_4^{2-} a sírovodíka H_2S). Sírovodík vzniká aj aneróbnym rozkladom odumretej organickej hmoty 7a v prílivových plochách na morskom pobreží. Ióny SO_4^{2-} sa do atmosféry dostávajú pri horení biomasy, prachovými búrkami a tiež prostredníctvom vlnobitia oceánu, prílivu a odlivu.

Najvýznamnejším zdrojom emisií síry do atmosféry je morská soľ. Jej hlavnou zložkou je chlorid sodný – NaCl, avšak v morskej vode sú prítomné aj ióny K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, SO_4^{2-} a ďalších prvkov. Niektoré druhy morských rias emitujú dimetylsulfid $(CH_3)_2S$, ktorý môže vytvárať jemné aerosóly pôsobiace ako kondenzačné jadrá premeny vodnej pary na vodu v oblakoch. Molekuly dimentylsulfidu reakciami s inými látkami konvertujú na oxid siričitý (SO_2) a následne na SO_3, SO_4^{2-} alebo H_2SO_4. **Rastliny** už dokážu ióny SO_4^{2-} priamo absorbovať koreňmi a **trofickými reťazcami** sa síra dostáva ku živočíchom. Z odumretej biomasy ju uvoľňujú rozkladače, špecifické baktérie sírne soli v anaeróbnom prostredí konvertujú na ióny S^{2-}. Tieto ióny reagujú s kovmi a vytvárajú síru obsahujúce kovové rudy, ktoré sa uchovávajú **v horninách**. Splachovaním dažďami a vodnou eróziou hornín sa síra dostáva do oceánov (obr. 3.9).



Obr. 3.9. Cyklus síry a jeho narušenie. *Upravené podľa:* Wikimedia Commons, *Autor:* Bantle, CC0 1.0, Public Domain. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sulfur Cycle %28Ciclo do Enxofre%29.png

Narušenie cyklu síry

Človek narušil cyklus síry predovšetkým nasledovnými procesmi:

1) Pri spaľovaní fosílnych palív, v menšej miere aj pri ťažbe minerálov z rúd obsahujúcich síru a rafináciou ropy, sa do atmosféry dostávajú veľké množstvá SO_2 (91 – 125 miliónov ton síry ročne – MAHOWALD 2013). Časť z nich oxiduje na SO_3. Oba oxidy sa môžu vetrami prenášať na vzdialenosti vyše 1 000 km

a vedú k diaľkovému cezhraničnému znečisťovaniu ovzdušia. Pri reakcii SO_3 so vzdušnou vlhkosťou vznikajú kvapôčky kyseliny sírovej (H_2SO_4), ktoré sú (spolu aj s aniónmi SO_4^{2-}) zložkami **kyslých atmosférických depozícií**, ktoré vedú k okysľovaniu (acidifikácii) ekosystémov.

2) **Acidifikácia** spočíva v okyslovaní pôdy a vody a má silne nepriaznivé vplyvy na rastliny (poškodzovanie pletív listov a koreňov, narušanie mykorízy a mikrobiálnych spoločenstiev, vyplavovanie bázových živín z pôdy a zvyšovanie mobility toxických iónov v pôde, najmä Al^{3+}). Kyslé depozície, ktorých prekurzormi boli oxidy síry a dusíka emitované v priemyselných centrách Anglicka, Nemecka, Poľska aj Československa viedli v nedávnej minulosti v severnej a strednej Európe k rozsiahlemu poškodeniu lesov a jazier. Acidifikácia v rôznej miere ohrozuje aj organizmy vodných ekosystémov. Dobrá správa je, že v dôsledku zníženia emisií síry acidifikácia ekosystémov v Európe výrazne ustúpila.

Môžeme zhrnúť, že **biogeochemické cykly zabezpečujú „recykláciu" prvkov potrebných pre život** (asi 25 prvkov, z nich 6 je absolútne kľúčových: H, C, O, N, P, S). Paradoxne, procesy, z ktorých tieto život udržujúce cykly pozostávajú sú súčasne mechanizmami plošného šírenia znečistenia po zemskom povrchu, či už ide o vysoký prísun živín, toxické syntetické chemikálie, nanomateriály či iné.

Ekosystémy v priebehu evolúcie dokázali prispôsobovať svoju spotrebu reálnemu prísunu daných prvkov a do určitej miery aj odolávať znečisteniu (JØRGENSEN 2012). Ich adaptačný potenciál však v dôsledku rozsiahleho antropogénneho narušenia biogeochemických cyklov naráža na svoje limity. Z náčrtu hlavných skupín narušení vyplývajú aj riešenia ako tieto narušenia minimálne zmierniť.

Zhrnutie kapitoly 3

Stavebné kamene neživej a živej hmoty

1) **Hmotou** sa vo fyzike nazýva látka alebo silové pole. **Látka** sa prejavuje vo forme diskrétnych útvarov, ktoré majú nenulovú pokojovú hmotnosť a energiu. Môže sa nachádzať v jednom zo štyroch základných skupenstiev: v tuhom, tekutom, plynnom a ako plazma. **Pole** má vlnovú povahu a nulovú pokojovú hmotnosť, pričom pôsobí na prvky a systémy v jeho okolí. Rozlišuje sa najmä gravitačné, elektromagnetické a jadrové pole, s ktorého pôsobením súvisia základné interakcie.
2) Najmenšie známe, nedeliteľné **subatómové elementárne častice sú kvarky, leptóny a bozóny** (každá má aj svoju antičasticu). Základnými vlastnosťami častíc sú hmotnosť, elektrický náboj, spin a magnetický moment. Základných kvarkov je šesť (u, d, c, s, t, b), ale pri rozlišovaní podľa kombinácií „farby", „vône" a „pôvabu" je ich niekoľko desiatok; a pôsobia na ne štyri základné interakcie: gravitácia, elektromagnetická sila, slabá jadrová interakcia a silná jadrová interakcia.
3) Podľa **teórie Veľkého tresku** vesmír vznikol z počiatočnej singularity. Rozpínaním sa ochladzoval, ako prvé vznikali elementárne častice, neskôr k nim jadrovou syntézou pribudli vodík (H) a hélium (He). Pre existenciu života sú nevyhnutné aj ťažšie prvky (najmä C, N, O, Mg, Si, P, S, K, Ca, Mn, Fe), ktoré vznikali a vznikajú jadrovými reakciami vnútri obrovských hviezd a v dôsledku rázových vĺn pri výbuchoch supernov.
4) Z 98 chemických prvkov vyskytujúcich sa v prírode k významným **biogénnym prvkom** patrí predovšetkým H, O, C, N, Na, P a Ca. V menších množstvách (pod 0,1 % hmotnosti organizmu) sú to Mg, K, Fe, S, Cl, Br, v stopových množstvách I, Zn, Cu, Co, Mn, Li, Mo, Si a iné. Tieto prvky budujú telá organizmov aj geologický podklad, to, čím sa v nich zásadne odlišujú, je ich organizácia, ktorá je zložitá už na úrovni organických zlúčenín a v organizmoch je vysoko rozmanitá.
5) **Vyššou úrovňou organizácie sú organické zlúčeniny**, tvorené aspoň dvoma atómami uhlíka v kombinácii s atómami iných prvkov, najmä vodíka a kyslíka, tiež dusíka, fosforu, síry, chlóru, fluóru a ďalších. Zreťazenie atómov uhlíka (C) je totiž vďaka jeho schopnosti viazať sa kovalentnými väzbami so spektrom iných atómov „chrbticou" organických zlúčenín. Základnými skupinami týchto zlúčenín sú uhľovodíky, sacharidy (glycidy), tuky (lipidy), proteíny (bielkoviny) a nukleové kyseliny.
6) **Základnou organizačnou jednotkou života je živá bunka**, ktorú od okolia oddeľuje selektívne prie-

pustná membrána. Vnútro bunky pozostáva z cytoplazmy, v ktorej sú rozpustené rôzne látky a z početných organel, ktoré zabezpečujú špecifické funkcie metabolizmu bunky. Bunka je základnou štrukturálnou a funkčnou jednotkou každého organizmu, nové bunky vznikajú delením, počas ktorého sa dcérskym bunkám odovzdáva aj v chromozómoch zakódovaná genetická informácia.

Prírodné zdroje v systémovej perspektíve

7) **Prírodný zdroj** je súčasť prírody, ktorú človek využíva pre svoje potreby a záujmy. Podľa **zákona zachovania hmoty** v izolovanom systéme nemožno hmotu zničiť ani vytvoriť, preto sú aj prírodné zdroje limitované a musíme ich využívať šetrne. Konvenčný pohľad ich hodnotí podľa ich využiteľnosti človekom a člení ich na hmotné, energetické a priestorové resp. na obnoviteľné a neobnoviteľné.
8) So zákonom zachovania hmoty úzko súvisí pojem **prírodný kapitál**, ktorý tvoria nielen prírodné zdroje, ale aj všetky prírodné (fyzikálne, chemické a biologické) procesy, funkcie ekosystémov, vrátane schopnosti a absorbovať odpady produkované spoločnosťou a všetky ďalšie ekosystémové služby, ktoré umožňujú existenciu aj prosperitu ľudskej spoločnosti.
9) Systémový pohľad hovorí, že prírodné zdroje Zeme sú **nevyhnutné aj pre život ďalších živých organizmov**. Prírodným zdrojom je všetko, čo organizmus resp. druh potrebuje k svojmu prežitiu, rastu a reprodukcii. To znamená, že pri čerpaní prírodných zdrojov musíme brať do úvahy aj nevyhnutnosť ochrany a udržania biologickej diverzity, ekologickej zložitosti a integrity dotknutých ekosystémov.

Obeh látok, život udržujúce cykly a ich narušenie

10) Všetky organizmy vyžadujú k svojmu životu **živiny,** chemické prvky, ktoré využívajú pre svoj rast a metabolizmus. Ich prvotným zdrojom sú **minerály** prítomné v zemskej kôre. Výsledkom zvetrávania, pôsobenia živých organizmov, vody a gravitácie je pôda, zložitý útvar tvorený minerálnymi časticami, detritom, vodou, v nej rozpustenými živinami a plynmi. Pôdotvorné procesy a vertikálny presun živín vytvárajú pôdne horizonty, na základe ktorých sa pôda člení na pôdne typy.
11) **Cykly biogeochemických prvkov** spočívajú v kontinuálnom obehu vody, živín a ďalších chemických prvkov medzi atmosférou, hydrosférou, litosférou, pedosférou a biotou. Poháňané sú slnečnou energiou, zemskou gravitáciou a pôsobením organizmov. Podmienkou obehu živín je **rozklad detritu**, na ktorom sa podieľajú dekompozítory a detritivory a ktorého výsledkom sú jednoduché vo vode rozpustné anorganické a organické zlúčeniny, ktoré môžu byť absorbované rastlinami. K významnými procesom v týchto cykloch patrí aj premena anorganických látok pôsobením mikroorganizmov do formy, v ktorej ich môžu prijímať autotrofné organizmy.
12) Pri obehu vody sa rozlišuje veľký vodný cyklus (výmena vody medzi oceánmi a pevninou) a malý vodný cyklus (iba nad pevninou alebo oceánom). Voda sa vyparuje **evaporáciou** z vody, pôdy a substrátu a **transpiráciou** z rastlín. Vodná para stúpa do výšky, rozpína sa, ochladzuje, **kondenzuje** a padá na zemský povrch v podobe **zrážok**. Časť takto spadnutej vody zachytí povrch rastlín (**intercepcia),** prevažná časť **odteká** po zemskom povrchu a vlieva sa späť do morí, oceánov a jazier. **Retencia** je schopnosť vegetácie zachytávať časť zrážkovej vody a postupne ju uvoľňovať. Časť zrážok padá vo fome snehu, ktorý sa vo vysokých polohách a v polárnych oblastiach **mení na ľad.** Časť zrážok **vsakuje** do pôdy, **infiltrácia** pokračuje až po nepriepustnú horninu, čím sa dopĺňajú zásoby podzemnej vody. Podzemná voda miestami **vyviera** na povrch a odteká po ňom.
13) K procesom narušenia kolobehu vody patrí najmä **vyčerpávanie vodných zdrojov**. Súvisiacim problémom je **znižovanie retenčnej aj infiltračnej kapacity krajiny** v dôsledku odlesňovania, rozorávania lúk a pasienkov, likvidácie brehových porastov a mokradí a rozširovaním zástavby a ciest. Tiež **zmena klímy** znamená zohrievanie povrchu ocenánov a kontinentov, a tým vyššiu evaporáciu, ale vedie aj k zmene intenzity, frekvencie a rozloženia zrážok na zmeskom povrchu.
14) Uhlík sa v atmosfére nachádza najmä vo forme oxidu uhličitého (CO_2) a metánu (CH_4). CO_2 je z atmosféry a vody odbúravaný **fotosyntézou** a rozpúšťa sa v oceánoch. Do atmosféry sa vracia procesmi **respirácie** a **rozkladu** organickej hmoty. Mnohé morské živočíchy uhlík zabudúvajú do vonkajších aragonitových schránok a je tiež súčasťou skeletu planktónu. Odumreté organizmy klesajú

až na dno, kde vápenaté skelety zhutňuje obrovský tlak vody. Po geologickom výzdvihu sedimentov sa z nich uvoľňuje zvetrávaním. Do atmosféry sa tiež dostáva pri sopečnej aktivite.

15) Človek výrazne **narušil prirodzený cyklus uhlíka,** predovšetkým ťažbou a spaľovaním fosílnych palív a zmenou krajinnej pokrývky, najmä odlesňovaním a rozorávaním trávnych porastov, čím sa znížila kapacita absorbérov CO_2. Poľnohospodárstvo prispelo k rastu koncentrácie metánu (CH_4) v dôsledku rozšírenia chovu dobytka a pestovania ryže. Ďalšie množstvá metánu sa do ovdušia uvoľňujú pri roztápaní permafrostu a otepľovaní oceánov.
16) Atmosférický dusík fixujú do amoniaku (NH_3) **baktérie** žijúce v symbióze na koreňoch bôbovitých rastlín a baktérie žijúce v pôde. Z NH_3 vo vode vznikajú katióny NH_4^+, ktoré sú rastliny schopné prijímať. Prevažná časť amoniaku sa pôsobením nitrifikačných baktérií mení na nitrátové ióny NO_3^- tiež využiteľné rastlinami. Živočíchy získavajú dusík konzumáciou rastlín, v detrite jeho zlúčeniny konvertujú rozkladače na amoniak a ióny NH_4^+. Nitrátové ióny NO_3^- môžu byť **v procese denitrifikácie** konvertované denitrifikačnými baktériami spätne na plynný dusík (N_2) a oxid dusný (N_2O).
17) **Spaľovanie fosílnych palív** vedie k emisiám oxidov dusíka, ktoré sú prenášané na veľké vzdialenosti, sú prekurzormi kyslých atmosférických depozícií. **Priemyselná fixácia dusíka** za účelom produkcie minerálnych hnojív dnes násobne prevyšuje jeho biologickú fixáciu. Minerálne hnojivá sú zdrojom oxidu dusného (N_2O), ktorý je významným skleníkovým plynom a v stratosfére sa podieľa na poškodzovaní ozónovej vrstvy. Hnojenie je zdrojom zlúčenín dusíka splachovaných z polí do vodných ekosystémov, kde v stojatých a pomaly tečúcich vodách vedú ku **kultúrnej eutrofizácii**.
18) Z hornín sa fosfor zvetrávaním a vodnou eróziou dostáva do pôdy a vody, odkiaľ sú fosfátové ióny PO_4^{3-} už priamo **absorbovateľné** rastlinami. Po prechode trofickými reťazcami ho späť do pôdy a vody vracajú rozkladače. Riečnymi sieťami sa dostáva do oceánov, kde **sa ukladá v sedimentoch** a na začiatok cyklu sa vracia až v priebehu geologických epoch. Tento cyklus narušila ťažba fosforu z hornín, najmä však jeho zvýšený prísun do pôdy v dôsledku intenzívneho hnojenia.
19) Významným biogénnym prvkom je aj síra, rastliny koreňmi absorbujú ióny SO_4^{2-}. Z odumretej biomasy ju uvoľňujú rozkladače vo forme síranov, ktoré baktérie konvertujú na ióny síry S^{2-}. Človek narušil tento cyklus najmä spaľovaním fosílnych palív. Emisie oxidov síry môžu byť prenášané na veľké vzdialenosti a spolu s oxidmi dusíka sú prekurzormi **kyslých atmosférických depozícií**.

Otázky

1) Vysvetlite hierarchiu stavebných kameňov hmoty od elementárnych častíc k atómom.
2) V čom spočívajú životodarné vlastnosti vody? Vysvetlite.
3) Aké významné skupiny organických zlúčenín poznáte? Čo sú to gény?
4) Čím sa odlišujú konvenčný a systémový pohľad na prírodné zdroje?
5) V čom spočíva systémový pohľad na biogeochemické cykly?
6) Opíšte vodný cyklus. Ako malý vodný cyklus ovplyvňuje zmena krajinnej pokrývky?
7) Čím človek narušil vodný cyklus?
8) Opíšte cyklus uhlíka a vysvetlite jeho antropogénne narušenie.
9) Opíšte cyklus dusíka a jeho narušenie človekom.
10) Opíšte cyklus fosforu / alternatívne cyklus síry a jeho narušenie.

Kritické zamyslenie

1) Môže mohutnosť a vek vesmíru súvisieť s potrebami života?
2) Môžu byť fosílne palivá plne nahradené alternatívnymi zdrojmi?
3) Aké sú limity používania biomasy ako obnoviteľného zdroja energie?

„Zdá sa mi, že prírodný svet je najväčším zdrojom vzrušenia; najväčším zdrojom vizuálnej krásy; najväčším zdrojom intelektuálneho záujmu. Je najväčším zdrojom toľkého v živote, že tento život má cenu žiť.“

David Attenborough

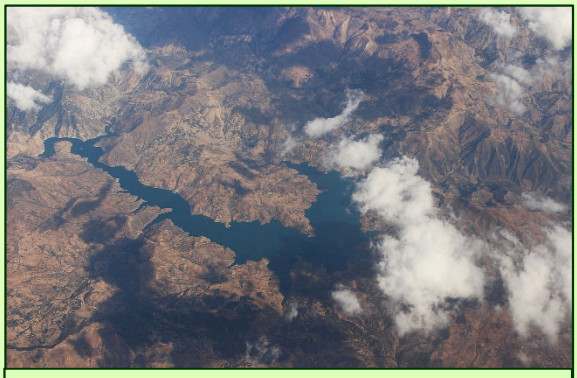
4 Hybné sily života – energia a informácia

Základom pohybu, transformácií a usporiadania hmoty v systéme, základom života každej bunky, existencie rastlín, húb a živočíchov, fungovania ekosystémov a Zemského ekologického systému, ako aj zabezpečenia prosperity ľudskej spoločnosti je energia, predovšetkým slnečná energia. Slnečné žiarenie preniká atmosférou a je hlavnou hybnou silou vetra, morských vĺn a prúdov, klímy a počasia. Bez neho by neexistovala ani fotosyntéza a život na Zemi by nemal šancu sa rozvinúť do úžasnej rozmanitosti a krásy. V tieni hmoty a energie niekedy ostáva informácia, genetická, chemická, kultúrna, ktorá je pre život tiež kritická. Jej nosičmi sú gény, chemickí poslovia, ako sú napr. hormóny alebo prchavé organické látky (prenášajúce podľa novších výskumov informáciu medzi jednotlivými stromami v lese alebo na savane).

Energetická revolúcia v Maroku

V oblasti využívania energie dnešný svet čelí dvom výzvam. Prvou je rastúci dopyt po energii a potreba zabezpečiť jej zdroje, ale aj potreba jej šetrenia a efektívneho využívania. Druhou je zmena klímy, ktorá si vyžaduje znížiť spotrebu fosílnych palív a nahradiť ich obnoviteľnými zdrojmi.

Technológie využitia obnoviteľných zdrojov energie menia tvár kontinentov. V Afrike je pozoruhodný vývoj v Maroku, štáte s piatou najväčšou ekonomikou v Afrike. Ešte pred desaťročím sa tu obnoviteľné zdroje podieľali na produkcii elektrickej energie iba 10 %. V období 2002 – 2015 však požiadavky na elektrickú energiu rástli až o 6 – 7 % ročne.



Priehrada Asfalou na rieke Asfalou v severnom Maroku slúži na zásobovanie vodou, zavlažovanie, ochranu pred povodňami a výrobu elektrickej energie. *Foto:* © Peter Urban, 2017.

Výrazná časť jej produkcie je zo spaľovania fosílnych palív, pri ktorých je Maroko z 90 % odkázané na import. Na túto situáciu štát reagoval prijatím Národnej energetickej stratégie (v roku 2008), ktorej prioritou sú obnoviteľné zdroje, s ambicióznym cieľom dosiahnuť nimi do roku 2020 42 %-né a do roku 2030 až 52 %-né pokrytie spotreby elektriny. K najstarším obnoviteľným zdrojom energie v Maroku patria vodné elektrárne, ktorých inštalované kapacity v roku 2015 predstavovali 1 770 MW (s ročnou produkciou 3 700 GWh) a do roku 2020 majú prekonať 2 000 MW. K 140 veľkým vodným nádržiam (zväčša bez produkcie elektriny) má pribudnúť ďalších 60. K novším zdrojom patria veterné elektrárne, v roku 2016 produkovali 803 MW, plánovaná kapacita do roku 2030 je 4 200 MW. Za perspektívne sa považuje aj využívanie geotermálnej energie a produkcie bioplynu z odpadu.

Najväčší boom zažíva rozvoj slnečných elektrární. Maroko patrí k štátom s najvyšším oslnením povrchu, ktoré na púšti dosahuje až 3 600 hodín ročne. Do roku 2030 má inštalovaná kapacita solárnych elektrární dosiahnuť až 4 560 mW. Má ísť o slnečné elektrárne prevažne na báze technológie CSP, čo znamená koncentráciu slnečného žiarenia systémom parabolických zrkadiel na menšie prijímače, ktoré ohrievajú vodu alebo iné médium a následne teplo transformujú na elektrickú energiu. V púšti buduje Maroko päť nových slnečných elektrární, pričom elektráreň v Ouarzzate má byť najväčšou solárnou elektrárňou v Afrike. Maroko plánuje elektrickú energiu aj vyvážať, odberateľmi majú byť najmä blízke Španielsko a Portugalsko a susedné africké štáty. Veľkolepé plány má aj priemyselné konzorcium Desertec, ktoré podporuje rozvoj slnečných a veterných elektrární v celej oblasti Severnej Afriky a Blízkeho východu, ktoré by mohli v budúcnosti pokrývať až 15 % spotreby elektrickej energie v EÚ.

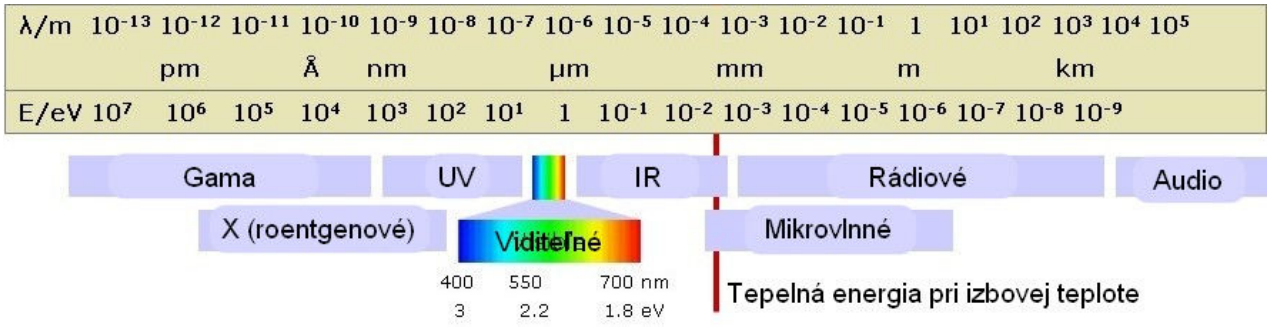
Upravené podľa: Cirlig 2013; Hochberg 2016; Azeroual et al. 2018

4.1 Energia, insolácia Zeme a zonálnosť vegetácie

Energia (z gréc. *energeia* – aktivita, práca) je skalárna fyzikálna veličina, ktorá **predstavuje schopnosť fyzikálnej sústavy konať prácu** (t.j. vykonať pohyb, zmenu, transformáciu) alebo prenášať teplo. Energiu nie je možné vytvoriť ani zničiť, možno ju len transformovať z jednej formy na inú.

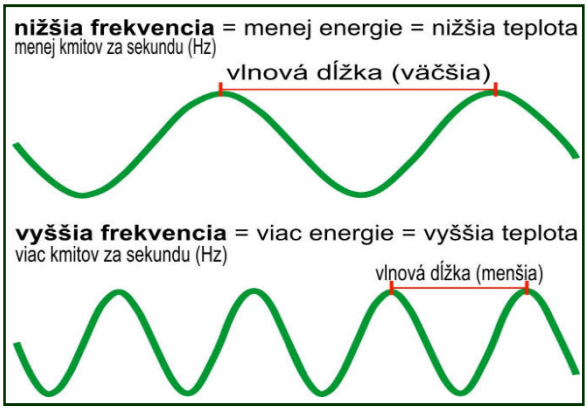
4.1.1 Základné formy a kvalita energie, energetický systém Zeme

Existuje viacero druhov energie. **Kinetická (pohybová) energia** sa vzťahuje k pohybu objektu v priestore a závisí od jeho hmotnosti a rýchlosti ($E = ½.m.v^2$), napr. energia pohybujúcich sa elektrónov vo vodivom materiáli, energia tečúcej vody, morských vĺn, vetra alebo energia pohybujúcich sa vozidiel. Prejavom kinetickej energie je aj **tepelná energia (teplo),** ktorá je dôsledkom pohybu všetkých pohybujúcich sa prvkov v telese, napr. atómov alebo molekúl v substancii. Osobitnou formou kinetickej energie je aj **energia elektromagnetického žiarenia**, ktorá sa šíri vo forme elektromagnetických vĺn, ako kombinácie vlnenia elektrického a magnetického poľa. Toto žiarenie sa ďalej člení podľa dĺžky jeho vĺn resp. energie (napr. gama žiarenie, röntgenové, ultrafialové, viditeľné svetlo, infračervené, mikrovlnné, rádiové žiarenie – obr. 4.1).



Obr. 4.1. Spektrum elektromagnetického žiarenia, vlnové dĺžky a energia. *Autor:* Kristian Molhave, The Opensource Handbook of Nanoscience and Nanotechnology, Creative Commons BY 2.5. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TheElectromagneticSpectrum.jpg

Vlnová dĺžka žiarenia vyjadruje vzdialenosť medzi dvomi po sebe nasledujúcimi najbližšími bodmi jeho postupného periodického vlnenia (napr. medzi jeho amplitúdami). Táto dĺžka je v obrátenom pomere k teplote objektu a k ním vyžarovanej energii. Čím je teleso teplejšie, tým sú vlnové dĺžky emitovaného žiarenia kratšie a ich frekvencia a obsah energie sú vyššie (obr. 4.2).



Obr. 4.2. Ilustrácia vlnovej dĺžky a frekvencie žiarenia. *Graf:* © Radovan Malina.

Potenciálna (polohová) energia objektu je v ňom uchovaná energia, ktorá je potenciálne využiteľná. Potenciálna energia ľubovoľného telesa závisí od jeho polohy v dosahu pôsobenia určitej vonkajšej sily – gravitačnej (napr. energia vody v nádrži vodnej elektrárne), elektrickej alebo sily magnetickej príťažlivosti.

Vnútornou energiou telesa je v ňom obsiahnutá energia, ktorá nezahŕňa kinetickú ani polohovú energiu systému ako celku. Je to súborná energia všetkých mikroskopických režimov energie, ktoré súvisia s náhodným pohybom a vnútornou štruktúrou molekúl. Zahŕňa energiu spojenú s premiestňovaním, rotačnými a vibračnými pohybmi molekúl a energiu spojenú s vnútromolekulovými silami, ako aj energiu, ktorá súvisí s polohou, pohybom a spinom elektrónov, ich interakcií s jadrom resp. interakcií medzi jadrami atómov (SHANTHINI 2006). Vnútorná energia telesa silne súvisí s jeho makroskopickými vlastnosťami ako sú teplota, tlak, objem, elektrický náboj, povrchové napätie a ďalšie.

Jednotky energie a ich prevody (štandardné sú J, kWh, eV, neštandardné sú cal, erg, barel)

Jednotkou energie a práce odvodenou zo základných jednotiek v medzinárodnej sústave SI je joule (J). 1 joule predstavuje prácu vykonanú silou 1 N (newton) po dráhe dlhej 1m (1J = 1N.m = 1 $kg.m^2.s^{-2}$). V niektorých vedných odboroch a hospodárskych sektoroch sa používajú aj iné jednotky:

V atómovej fyzike: elektrónvolt (eV) je množstvo energie realizované prechodom elektrónu (e) medzi dvomi bodmi s rozdielom elektrického potenciálu 1 volt. 1 eV = $1.6021765.10^{-19}$ J.

V energetike: kilowatthodina (kWh) označuje výkon (množstvo práce za jednotku času) 1 000 W pôsobiaci po dobu jednej hodiny (1 kWh = 3 600 kJ). 1,7 MWh zodpovedá spáleniu jedného barelu ropy.

V potravinárstve: kalória (cal) označuje energiu potrebnú na zohriatie 1g vody z 14,5 °C na 15,5 °C (merná tepelná kapacita vody totiž závisí od jej teploty). Štandardný prevod je 1 cal = 4,1868 J, 1 J = 0,238,8 cal.

Zdroj: ENERGOPORTÁL 2020

Slnečná energia

Horúca plazma je hlavným skupenstvom Slnka, ktoré obsahuje ca 99,8 % všetkej látky našej slnečnej sústavy. Slnečná energia vzniká vnútri Slnka, v dôsledku termonukleárnych reakcií (pri teplote plynov dosahujúcej 15 miliónov °C), pri ktorých dochádza k syntéze ľahšieho vodíka na ťažšie hélium a k toku fotónov, ktoré udržujú povrchovú teplotu Slnka približne 5800 Kelvinov. Slnko emituje energiu vo forme elektromagnetického žiarenia, celková veľkosť toku tohto žiarenia je približne $9,5.10^{25}$ W (PIDWIRNY 2012). Vzhľadom k tomu, že naše Slnko emituje túto energiu už miliardy rokov a podľa vedeckých prognóz je ešte ďalšie miliardy rokov bude emitovať, slnečná energia sa považuje za trvalo obnoviteľný prírodný zdroj.

Slnečné žiarenie je vysokoenergetické, jeho podstatná zložka je krátkovlnné žiarenie. Súčasne je polychromatické, t.j. zahŕňa rôzne vlnové dĺžky, od röntgenového žiarenia, cez ultrafialové žiarenie, viditeľné svetlo, infračervené žiarenie až po mikrovlny a rádiové vlny. Keďže tok žiarenia sférického telesa klesá s druhou mocninou vzdialenosti od jeho zdroja, planéty bližšie k Slnku ho dostávajú viac. Napriek tomu, že tok žiarenia k Zemi sa oproti úsvitu života zvýšil o 25 %, tento tok je vzhľadom na existenciu a evolúciu života dlhodobo primeraný – pri pátraní astronómov po živote na iných planétach, patrí k rozhodujúcim parametrom aj vzdialenosť planéty od jej slnka. Intenzita toku slnečného žiarenia smerom k Zemi sa v malom rozmedzí aj periodicky mení, najmä v závislosti od postavenia Zeme voči Slnku a od zmien slnečnej aktivity. Najznámejší je 11-ročný cyklus, v ktorom sa prepóluje magnetické pole Slnka.

Tri najvýznamnejšie zložky slnečného žiarenia

Ultrafialové (UV) žiarenie predstavuje asi 9 % slnečného žiarenia prichádzajúceho k Zemi. Zo žiarenia dopadajúceho na jej povrch je 90–99 % žiarenie UV-A (vlnových dĺžok 315 – 400 nm), 1–10 % predstavuje pre živé organizmy nebezpečné žiarenie UV-B (280-315 nm), pretože jeho podstatnú časť absorbuje ozónová vrstva. Letálne UV-C žiarenie (pod 280 nm) je plne absorbované touto vrstvou.

Viditeľné svetlo (v rozsahu približne 380 – 740 nm) je viditeľné ľudským okom, ide o 40 – 41% dopadajúceho slnečného žiarenia. Náš mozog interpretuje vlnové dĺžky ako farby, viditeľné žiarenie najkratších vlnových dĺžok ako fialovú a najdlhších ako červenú. Najväčšia intenzita vyžarovania Slnka je vo vlnových dĺžkach 500 nm, čo zodpovedá zelenej farbe. Pretože práve vegetácia ho najviac odráža, jej farbu vnímame ako zelenú.

Infračervené žiarenie (vlnových dĺžok 760 nm – 1 mm), t.j. dlhších ako má viditeľné svetlo, ale kratších ako má mikrovlnné žiarenie. Predstavuje zhruba 50 % na zemský povrch dopadajúceho slnečného žiarenia.

Zdroj: STRAHLER & STRAHLER 1997

Kvalita energie, exergia

Pri analýzach systémov nevystačíme iba s otázkami kvantity energie. Dôležitá je aj jej kvalita, potenciálna užitočnosť, miera jej schopnosti konať prácu vo vzťahu k referenčnému prostrediu. Kvantitu a kvalitu energie v termodynamickej teórii vyjadruje pojem **exergia.** Exergia označuje maximálnu možnú užitočnú

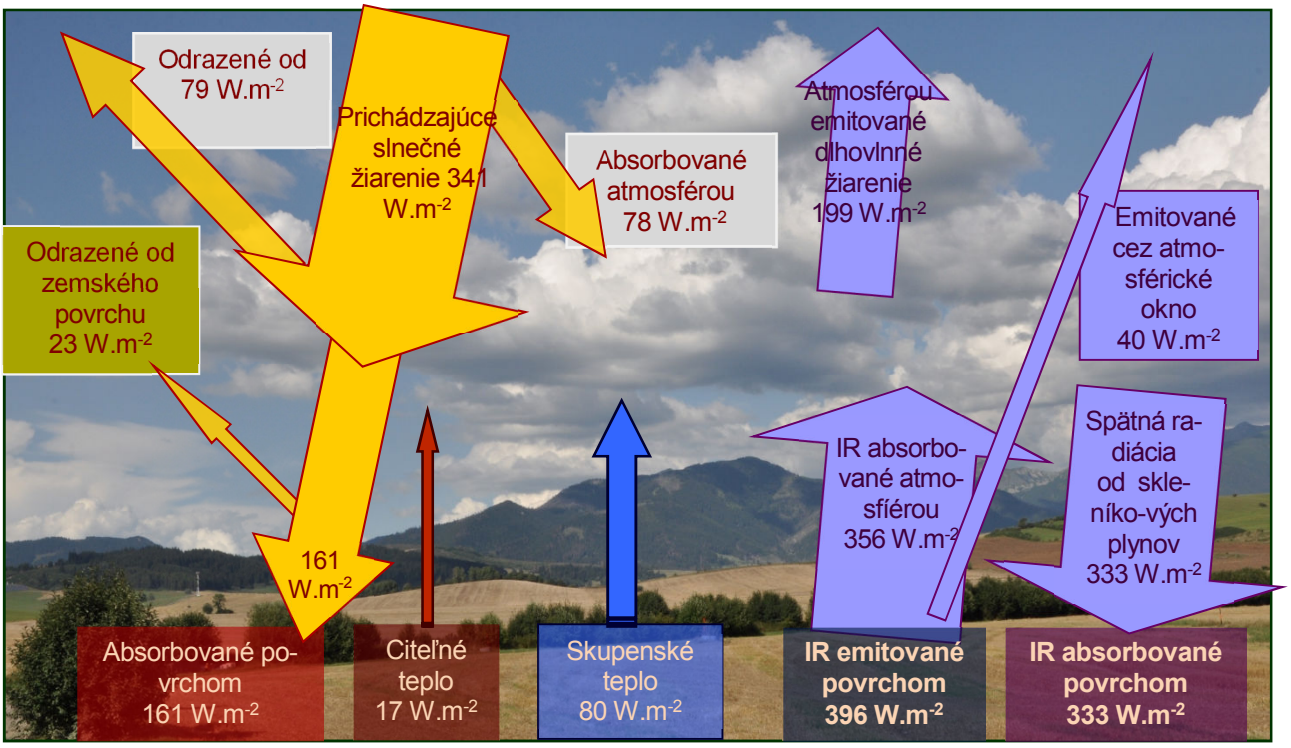
prácu, ktorú je systém schopný vykonať, kým sa dostane do tepelnej rovnováhy s okolím (JØRGENSEN & SVIREZHEV 2004.). Kým energia pri transformáciách iba mení formu, **exergia systému sa vždy znižuje.**

Vysokú exergiu má napr. slnečná energia, chemická energia biomasy alebo fosílnych palív a hnojív, elektrická energia a pod., ale tiež dodatková energia dodávaná do socioekonomických systémov vo forme ľudskej práce a energie fosílnych palív, ktorú si vyžaduje fungovanie a obhospodarovanie poloprírodných a antropogénnych ekosystémov (napr. kosných lúk, oráčin, mestských parkov). Príkladom energie vysokej kvality sú aj horúce vývery podmorských sopečných prieduchov umožňujúce život hlbokomorských spoločenstiev. Môžeme zhrnúť, že **toky vysokokvalitnej energie** (s vysokou exergiou) do živých systémov **sú základnou podmienkou a hnacou silou** ich vzniku, existencie, ontogenézy aj biologickej evolúcie, vrátane udržania a zvyšovania prirodzenej zložitosti týchto systémov.

Základný energetický systém Zeme

Kľúčovým zdrojom energie pre život na Zemi je **kontinuálny prísun slnečnej energie** – jej podiel na vstupoch do Zemského energetického systému je až 99,97 %. Druhým významným zdrojom je geotermálna energia s približne 0,025 % podielom. Ide o tepelnú energiu, ktorej zdrojom je rádioaktívny rozpad minerálov v zemskej kôre a predovšetkým v zemskom jadre. Hybnou silou jej toku k zemskému povrchu je geotermálny gradient – rozdiel teploty jadra (približne 5 000 °C) a povrchu (v dlhodobom priemere 15 °C). Výrazne menšia je energia prílivu a odlivu (ako výsledok pôsobenia gravitačných síl Mesiaca a Slnka). Iba malým zlomkom slnečnej energie je aj energia získaná spaľovaním fosílnych palív.

Žiarivá energia Slnka dopadajúca na plochu kolmú k slnečným lúčom je pred vstupom do zemskej atmosféry takmer konštantná, cca 1 367 W.m^{-2} (PIDWIRNY 2012). Avšak len malá časť zemského povrchu a krátku dobu je obrátená kolmo na slnečné lúče, preto priemerná energia smerujúca k zemskému povrchu je iba približne 342 W.m^{-2} (KIEHL & TRENBERTH 1997). Z prichádzajúceho slnečného žiarenia sa asi 31 % odráža od oblakov, molekúl plynov a čiastočiek prachu v atmosfére a od zemského povrchu.



Obr. 4.3. Globálna bilancia žiarenia v systéme atmosféra – zemský povrch. Zemský povrch absorbuje asi 49 % k Zemi prichádzajúceho žiarenia. To je využité na zohriatie povrchu a toky tepla do pôdy a atmosféry, na evapotranspiráciu, aj na fotosyntézu (v grafe je zanedbaná) a následne je emitované zemským povrchom vo forme dlhovlnného infračerveného (IR) žiarenia. Podstatnú časť IR zachytia skleníkové plyny atmosféry a väčšinu vyžarujú späť k zemskému povrchu. *Upravené podľa:* TRENBERTH et al. 2009. *Foto:* © Peter Sabo.

Ďalších zhruba 20 % absorbuje atmosféra (obr. 4.3). **Zemský povrch absorbuje v priemere približne 49 % slnečného žiarenia** (STRAHLER & STRAHLER 1997). Táto časť žiarenia vstupuje do rozmanitých transformácií energie v prírodných systémoch. Spotrebúva sa na ohrev zemského povrchu, na tok tepla do pôdy a najmä na evaporáciu a transpiráciu.

Vertikálny transport energie od zemského povrchu do atmosféry sa realizuje tromi typmi procesov:

1) **sálaním tepla (radiáciou tepla)** – emitovaním elektromagnetického žiarenia zemským povrchom (v tomto prípade dlhovlnného žiarenia s nízkou exergiou);
2) **vedením tepla (kondukciou tepla)** – odovzdávaním kinetickej energie medzi časticami látky (v tomto prípade molekulami vzduchu);
3) **prúdením tepla (konvekciou tepla)** – šírením tepla v kvapalinách a plynoch premiestňovaním častíc s väčšou energiou, v tomto prípade najmä vody v ovzduší.

Teplo, ktoré dodávaním alebo odoberaním tepla spôsobuje zmenu teploty telesa, napr. v dôsledku ohrievania troposféry zohriatym zemským povrchom, sa nazýva **citeľné teplo**. Iným druhom tepla **je skupenské (latentné) teplo**, ktoré je potrebné látke dodať alebo odobrať na to aby sa zmenilo jej skupenstvo. V dôsledku vysokého skupenského tepla vody sa na jej výpar spotrebuje obrovské množstvo energie, ktoré sa naopak uvoľňuje pri kondenzácii vodnej pary. Preto je táto energia významnou súčasťou motora globálnej atmosférickej cirkulácie, ktorý roztáča predovšetkým rotácia Zeme.

Skleníkový efekt

Zemská atmosféra je dostatočne transparentná pre slnečné žiarenie, ktoré dopadá na zemský povrch. Táto slnečná energia je palivom pre procesy v atmosfére, oceánoch aj na pevnine, vrátane jej využitia organizmami – aj keď v procesoch fotosyntézy sa jej využíva menej ako 1 % z celkovej bilancie.

Pri transformáciách energie sa vždy časť premieňa na teplo, ktoré zemský povrch vo forme dlhovlnného žiarenia emituje do vesmíru. Len jeho časť je emitovaná priamo (cez atmosférické okno), **podstatnú časť zachytia skleníkové plyny**, najmä vodná para, oxid uhličitý (CO_2), metán (CH_4), oxid dusný (N_2O), halogénované uhľovodíky (najmä CFC, HFC, PFC), ozón (O_3) a iné látky. Molekuly skleníkových plynov následne emitujú toto žiarenie všetkými smermi, pričom časť vracajú späť k zemskému povrchu. Dôsledkom je zohrievanie zemského povrchu a atmosféry, skleníkový efekt udržuje priemernú teplotu pri povrchu Zeme zhruba o 33 °C vyššiu (na úrovni približne + 15 °C), než aká by bola bez neho.

Skleníkový efekt na Venuši a na Marse

Atmosféra Venuše je 100 x masívnejšia a hustejšia ako atmosféra Zeme a obsahuje až 96 % CO_2 . Priemerný atmosférický tlak pri povrchu planéty je až 9,3 MPa (čo na Zemi zodpovedá tlaku v hĺbke 900 m pod hladinou oceánu). V dôsledku mimoriadne silného skleníkového efektu je priemerná teplota povrchu Venuše až 460 °C. Venuša sa často uvádza ako príklad lavínovitého skleníkového efektu (runaway greenhouse), ktorý na tejto planéte viedol k totálnej strate vody z jej povrchu aj z atmosféry.

Vysoká koncentrácia CO_2 je aj v atmosfére Marsu (95 %), ale je 100 x menej hustá ako atmosféra Zeme (jej hmotnosť je menej ako 1/200 hmotnosti atmosféry Zeme a atmosférický tlak predstavuje iba 0,6 % tlaku pri povrchu Zeme), skleníkový efekt je tu veľmi nízky a priemerná teplota na Marse je iba - 50 °C.

Zdroj: LACIS 2012

Skleníkový efekt je súčasťou širšieho spektra prirodzených faktorov, ktoré v minulosti viedli k zmenám klímy na Zemi a ktoré zahŕňajú napr. periodické zmeny orbitálnej dráhy Zeme, zmeny sklonu a precesie jej osi, zmeny solárnej aktivity, ale tiež putovanie pevninských dosiek, zmeny prúdenia vody v oceánoch, sopečnú činnosť, ako aj pády obrovských meteoritov. Za rozhodujúci motor súčasnej klimatickej zmeny sa považuje práve zosilnenie skleníkového efektu v dôsledku antropogénnych emisií skleníkových plynov, najmä v dôsledku spaľovania fosílnych palív, ale tiež rozsiahleho odlesňovania a iných zmien krajiny (IPCC 2014, 2019).

4.1.2 Podnebie (klíma) a klimatický systém

Tok slnečnej energie, ktorá dopadá na osvetlený zemský povrch sa nazýva **insolácia (oslnenie)**, udáva sa vo wattoch alebo megajouloch na jednotku povrchu, napr. $W.m^{-2}$, $MJ.m^{-2}$. Priemerná hodnota insolácie je 342 $W.m^{-2}$. **Denná insolácia** závisí od uhla dopadajúcich slnečných lúčov (najvyššia je pri uhle 90°) a od doby expozície. Hlavné topografické faktory, ktoré určujú oslnenie zemského povrchu sú zemepisná šírka, nadmorská výška, sklon a expozícia. **Ročná insolácia** je najvyššia na rovníku, smerom k pólom klesá. V tropických šírkach je bilancia toku žiarenia k zemskému povrchu kladná po celý rok, v miernom pásme je to približne 9 mesiacov a v polárnych oblastiach iba 6 mesiacov.

Šírkové pásma Zeme

Rozdielne oslnenie zemského povrchu, v závislosti od geografickej šírky a jeho zmeny počas dňa a roka podmieňujú rozloženie odlišných **šírkových pásiem Zeme** a v kombinácii s reliéfom kontinentov, ich povrchom a distribúciou zrážok určujú aj klímu**.** Veľmi zhruba sa prekrývajú s **podnebnými pásmami**, ktoré charakterizuje rovnaká makroklíma, ktorá však nezávisí iba od oslnenia Zeme, ale aj od globálnej cirkulácie atmosféry a vlastností zemského povrchu. Rozdielne oslnenie je základom vysokej dynamiky klimatického systému, ktorá zahŕňa denné a sezónne cykly, aj dlhé astronomické cykly, spojené so zmenami slnečnej aktivity, postavenia Zeme oproti Slnku, sklonu jej osi a i.

Šírkové pásma Zeme, oslnenie a priemerná teplota

Rovníkové pásmo – medzi 10° severnej a 10° južnej geografickej šírky je intenzívne oslnené po celý rok, dĺžka dňa a noci je približne rovnaká, zmena oslnenia je veľmi malá, napr. brazílske mesto Manaus (3°južnej geograf. šírky) má v priebehu roka vyrovnanú teplotu, priemerne 27 °C, mení sa zhruba iba o 1,7 °C.

Tropické pásma – medzi 10°- 25° severnej geografickej šírky a 10° - 25° južnej geografickej šírky, oslnenie je vysoké, zreteľné sú sezónne zmeny, napr. egyptský Aswan (24° severnej geo. šírky) má prebytok slnečnej radiácie po celý rok, pričom priemerná teplota sa mení pomerne málo: o 16 – 17 °C, od 16 °C v zime po 32 °C v lete.

Subtropické pásma – medzi 25° - 35° severnej geo. šírky a medzi 25° - 35° južnej geo. šírky, oslnenie je stále pomerne vysoké, pričom rozdiely priemernej teploty medzi ročnými obdobiami sú si podobné.

Mierne pásma – medzi 35° - 55° severnej geografickej šírky a 35° - 55° južnej geografickej šírky. Oslnenie sa v priebehu roka výrazne mení, výsledkom sú štyri ročné obdobia. Napr. nemecký Hamburg (53°33´ sev. geografickej šírky) má prebytok slnečného žiarenia po 9 mesiacov a nedostatok po 3 mesiace. Priemerná teplota sa tu mení v rozmedzí od 0 °C v zime do 16 °C v lete, stabilizuje ju vplyv Severného mora. V prípade vnútrozemskej Bratislavy (48° 15´severnej geografickej šírky) sú teplotné rozdiely vyššie – od -1° v januári po 21° v júli.

Subarktické / subantarktické pásmo – 55° - 60° severnej geografickej šírky a 55° - 60° južnej geografickej šírky, zmeny oslnenia a teploty v priebehu roka sa ďalej zvýrazňujú.

Arktické / antarktické pásmo – 60° -75° severnej geo. šírky a 60° - 75° južnej geo. šírky, zmeny oslnenia sú enormné. Napr. ruský Jakutsk (62 °severnej geo. šírky) má po šesť mesiacov deficit slnečnej radiácie a rozsah zmien teplôt je tu enormný, až 48 - 58 °C, od -35 až -45 °C v zimných mesiacoch po 13 °C v lete.

Polárne pásma – 75° - 90° severnej geo. šírky a 75° - 90° južnej geo. šírky, Slnko tu po 6 mesiacov nezapadá za obzor a po ďalších 6 mesiacov nevychádza, rozsah zmien teplôt je extrémny. Napr. v Antarktíde v lete teplota na pobreží dosahuje v priemere 5 - 15 °C a v zime klesá na menej ako – 80 °C.

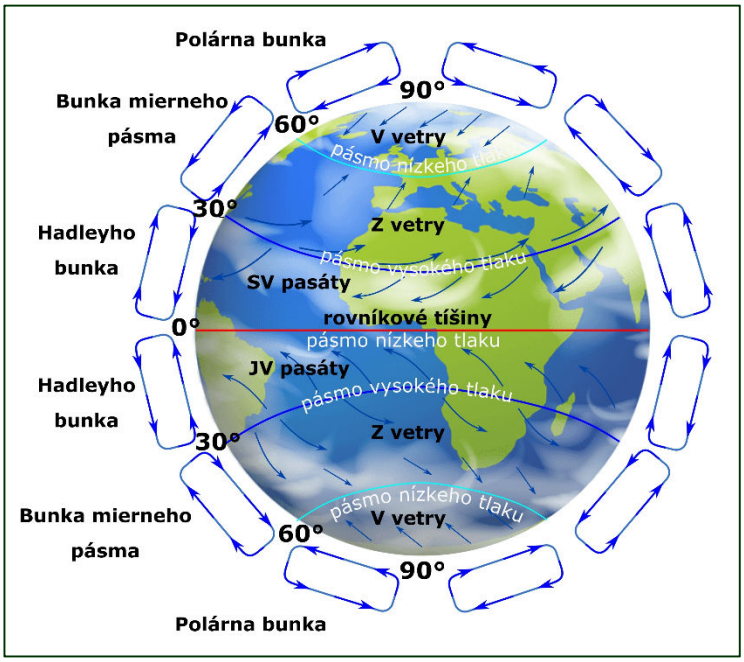
Zdroj: STRAHLER & STRAHLER 1997

Z prehľadu šírkových pásiem vidieť, že kým v oblasti rovníka a trópov je prísun slnečného žiarenia vysoko prebytkový, vo vyšších zemepisných šírkach je deficitný. Klimatický systém Zeme sa preto musí vyrovnávať aj s výrazným teplotným gradientom medzi rovníkom a pólmi, čo vedie k rozsiahlemu horizontálnemu transportu energie.

Transport energie a globálna cirkulácia atmosféry

Globálna cirkulácia atmosféry spočíva v pomerne pravidelnom celoplanetárnom pohybe vzduchových más, ktorý vyvoláva najmä nerovnomerné zohrievanie a ochladzovanie zemského povrchu a rotácia Zeme. Spolu s cirkuláciou oceánov distribuuje po planéte energiu a vodu. K hlavným mechanizmom horizontálneho transportu energie patria rozsiahle, kvázi pravidelné priestorové bloky globálnej cirkulácie atmosféry nazývané Hadleyho, Ferrelova a polárna bunka.

Napr. **Hadleyho bunka** začína výstupom teplého a vlhkého vzduchu nad rovníkom, kde sa vzduch najviac zohrieva, stúpa do výšky, rozpína sa, ochladzuje a kondenzuje, čím sa vytvára rovníková brázda nízkeho atmosférického tlaku s veľmi vysokými zrážkami. Vo vysokých výškach, po dosiahnutí hranice medzi troposférou a stratosférou, teplejší vzduch smeruje k pólom, ochladzuje sa a asi na úrovni 30° severnej a južnej zemepisnej šírky zostupuje k zemskému povrchu. Tým sa tu vytvárajú subtropické oblasti vysokého atmosférického tlaku, ktorým dominujú dve až štyri veľké a pomerne stabilné anticyklóny (STRAHLER & STRAHLER 1997). Pod nimi sa v dôsledku veľmi nízkych zrážok vytvorili púšte a polopúšte. Povrchovými vetrami sa vzduch, ktorý zostúpil k zemskému povrchu následne vracia späť k rovníku. Na Hadleyho bunku nadväzuje v miernych zemepisných šírkach **Ferrelova bunka** a na ňu smerom k pólom zas **polárna bunka** (obr. 4.4).



Obr. 4.4. Globálna atmosférická cirkulácia Zeme. Súčasťou klimatického systému je rozsiahla redistribúcia energie od rovníka smerom k pólom atmosférou a morskými prúdmi. V atmosfére sa to deje prostredníctvom obrovských konvekčných slučiek vzájomne prepojených cyklón a anticyklón. Ide o spontánne sa autoorganizujúce disipatívne štruktúry a procesy (pozri kap. 6), ktoré sa vytvárajú ako odpoveď na vysoký teplotný gradient medzi nerovnomerne zohrievaným zemským povrchom a atmosférou.

Schéma: © Radovan Malina, 2019. *Námet podľa:* NASA: Earth Global Circulation, Public Domain, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NASA_depiction_of_earth_global_atmospheric_circulation.jpg

Základom globálnej cirkulácie atmosféry sú prepojené systémy cyklón a anticyklón. Tlaková níž (cyklóna) je oblasť nízkeho tlaku vzduchu, ktorý je najnižší v jej strede a vzduch preto prúdi od jej okrajov do stredu, čím dochádza k vzostupným pohybom vzduchu a následne k veľkej oblačnosti so zrážkami. Keďže najviac sa zohrieva oblasť rovníka, pás rovníkovej tlakovej depresie obopína celú planétu. **Tropické cyklóny**, ktoré vznikajú nad oceánom sa môžu rozvinúť do hurikánov a tajfúnov. Ďalšie výrazné oblasti nízkeho tlaku vzduchu sa nachádzajú zhruba na šesťdesiatom stupni zemepisnej šírky oboch pologulí, na severnej sú to Islandská tlaková níž (ovplyvňujúca počasie v Európe) a Aleutská tlaková niž (v oblasti Aleutských ostrovov).

Tlaková výš (anticyklóna) je oblasť vysokého tlaku vzduchu, ktorý je najvyšší v jej strede, vzduch preto prúdi od jej stredu k okrajom a na jeho miesto klesá vzduch z väčších výšok, ktorý sa v dôsledku jeho stláčania ohrieva a jeho relatívna vlhkosť klesá, čo prináša málo oblačné až bezoblačné počasie. Smer vetrov v cyklónach a anticyklónach a skutočný tvar buniek cirkulácie atmosféry okrem tlakového gradientu ovplyvňujú aj ďalšie faktory. Patrí k nim najmä Coriolisova sila, vyvolaná rotáciou Zeme (stáča smery vetrov, na severnej pologuli doprava a na južnej doľava), ďalej veľkosť a rozloženie kontinentov a horských pásiem.

Atmosférou sa transportuje zhruba 60 % tepla prenášaného od rovníku k pólom a morskými prúdmi zvyšných 40 %. Ku kľúčovým vlastnostiam globálneho klimatického systému, ktoré pomáhajú udržiavať život na Zemi patrí aj **distribúcia vlahy z oceánov na pevninu** v rámci veľkého vodného cyklu. V našich miernych zemepisných šírkach je počasie silne premenlivé, na styku obrovských más studeného polárneho vzduchu a teplého tropického a subtropického vzduchu vznikajú putujúce cyklóny postupujúce na severnej pologuli smerom na východ a prinášajúce vlahu od oceánu hlboko do vnútrozemia. V posledných dvoch desaťročiach sme však svedkami vyšších oscilácií, rozkolísanosti tohto systému.

Podnebie (klíma)

Vyrovnávanie gradientov príjmu slnečnej energie zemským povrchom prenosmi energie atmosférou a morskými prúdmi vytvára klimatický systém aj počasie. **Počasie** vyjadruje aktuálny stav atmosférických javov nad určitým konkrétnym miestom, ktorý sa popisuje súborom meteorologických prvkov, ako sú najmä teplota, atmosférický tlak, relatívna vlhkosť vzduchu, oblačnosť, rýchlosť a smer vetra, zrážky.

Podnebie (klímu) vyjadrujú dlhodobé priemery premenných počasia, t.j. **dlhodobý prevažujúci charakter počasia** na určitom mieste alebo v regióne, ktorý vychádza zo štatistík meteorologických pozorovaní (štandardne 30 rokov) – ide o dlhodobé štatistické priemery meteorologických premenných, aj ich odchýlky, strmosť trendových kriviek (vyjadruje dynamiku zmien). Na distribúciu organizmov majú väčší vplyv extrémne hodnoty týchto premenných ako priemerné, práve extrémy súvisia so zvýšenou mortalitou určitých druhov organizmov a silne ovplyvňujú rozšírenie dlhovekých organizmov, napr. stromov.

Regionálna klíma je výsledkom vzájomného pôsobenia atmosféry, hydrosféry, litosféry, kryosféry, geosféry a biosféry v rozsiahlom území. **Miestna klíma** závisí od geografickej šírky, polohy v rámci kontinentu, nadmorskej výšky, bariérového efektu pohorí a pod. Charakter **mikroklímy** je určovaný nielen vplyvmi reliéfu (napr. severné vz. južné svahy), ale aj vplyvmi vegetácie a pôdy, rozsahom zatienenia, zmeny rýchlosti a sily vetra, teploty povrchu a pod. (STRAHLER & STRAHLER 1997).

Klimatický systém Zeme

Klimatický systém Zeme predstavuje jeden z kľúčových život udržujúcich systémov Zeme, ktorý poháňa kontinuálny prísun energie slnečného žiarenia, nerovnomerné oslnenie zemského povrchu a rotácia Zeme. Samotný systém je výsledkom synergie pôsobenia základných zložiek tohto systému, osobitne atmosféry, litosféry, pedosféry, hydrosféry, kryosféry a biosféry, ako aj ich vzájomných interakcií.

Porozumieť zložitej štruktúre a správaniu tohto systému je v súčasnosti potrebné najmä pre odlíšenie jeho antropogénnych narušení od jeho prirodzených oscilácií a pre prognózovanie vývoja klimatickej zmeny. **Hlavnými faktormi, ktoré určujú klimatický systém Zeme, sú** (BRANIŠ & HŮNOVÁ 2009):

1) Tok energie slnečného žiarenia a jeho priestorové rozloženie na zemskom povrchu, ktorý výrazne závisí od vzdialenosti a polohy Zeme voči Slnku a od intenzity slnečnej aktivity.
2) Chemické zloženie atmosféry, od ktorého závisí veľkosť toku energie slnečného žiarenia cez atmosféru k povrchu a veľkosť tepelnej energie (dlhovlnného IR žiarenia) zachytenej skleníkovými plynmi.
3) Vlastnosti zemského povrchu týkajúce sa jeho albeda (podielu žiarenia odrážaného od povrchu voči žiareniu, ktoré naň dopadá), vlhkosti a vegetačnej pokrývky (ktoré výrazne ovplyvňujú evapotranspiráciu).
4) Globálna cirkulácia atmosféry a cirkulácia morských prúdov, ktoré prenášajú energiu smerom od rovníka (kde jej je prebytok) až k polárnym oblastiam, ktoré po väčšinu roka čelia jej deficitu.

Ročný priebeh teploty ovzdušia (meranej od roku 1850 štandardne vo výške 2 m nad zemským povrchom klasickými ortuťovými teplomermi) modelujú aj **rozdiely medzi pevninou a oceánom**. Pevnina sa rýchlejšie zohrieva aj ochladzuje, teplotné maximá a minimá sa v miernych šírkach oneskorujú za zimným aj letným slnovratom v priemere o mesiac (nad oceánom až o dva mesiace). Je to spôsobené vysokým skupenským teplom vody a tiež tým, že slnečné žiarenie preniká pomerne hlboko do vody. Oceán je preto schopný pomaly naakumulovať obrovské množstvo tepla, ktoré sa rovnako pomaly uvoľňuje. V lete sú preto oceány v miernom pásme chladnejšie ako pevnina a v zime naopak teplejšie.

Adiabatický proces

Spočíva v ochladzovaní alebo otepľovaní vzduchu iba v dôsledku zmeny tlaku. Patrí k významným mechanizmom prenosu energie v atmosfére. Rozpínaním „balíka teplejšieho vzduchu“, ktorý je ohriaty od zemského povrchu, pri jeho vzostupe v atmosfére sa tlak znižuje, vzduch sa rozpína, ochladzuje a pri teplote rosného bodu nastáva kondenzácia vodných pár, pri ktorej sa uvoľňuje energia (preto teplota v oblakoch so stúpajúcou výškou klesá pomalšie ako teplota okolitého vzduchu). Naopak, stláčaním vzduchu (pri poklese v atmosfére) sa tlak zvyšuje, vzduch sa otepľuje a oblaky sa rozpúšťajú.

Adiabatický proces sa výrazne uplatňuje aj pri vzniku tropických cyklón a monzúnových dažďov. Horolezci v Himalájach musia na výstupy využívať iba zimné a jarné mesiace, kedy je nad vychladeným ázijským kontinentom obrovská Sibírska výš, ktorá prináša dlhodobé jasné počasie. Naopak, v lete sa obrovská masa ázijskej pevniny vyhreje, ohriaty stúpajúci vzduch sa rozpína, barometrický tlak sa znižuje a následné vetry, ktoré smerujú od Tichého oceána dovnútra Ázijskej níže (do miesta nižšieho tlaku), prinášajú do veľkej časti kontinentu daždivé monzúnové počasie.

Zdroj: STRAHLER & STRAHLER 1997

Zmena klímy

Klimatický systém patrí k život udržiavajúcim systémom Zeme a určuje rozmiestnenie jednotlivých vegetačných pásiem a ekoregiónov (OLSON et al. 2001). K najväčším problémom súčasnosti patrí globálna **zmena klímy,** tentoraz v podstatnej miere spôsobená človekom. Podľa Medzivládneho panelu pre zmenu klímy (IPCC – *Intergovernmental Panel for Climate Change*), priemerná globálna teplota ovzdušia pri zemskom povrchu (meraná vo výške 2 m nad zemou) sa najmä od roku 1950 dlhodobo zvyšuje (za posledných 50 rokov rýchlosťou až 0,17 °C za desaťročie, HANSEN 2018). Podľa novšej správy IPCC (2018) sa oproti predindustriálnej dobe táto teplota zvýšila o cca 1 °C. Ak aby sme do roku 2100 mali udržať celkové globálne oteplenie pod hranicou 1,5 °C, uhlíkovú neutralitu potrebujeme dosiahnuť najneskôr do roku 2050, v prípade prahu 2 °C najneskôr do roku 2070. Problém je, že napriek týmto prognózam emisie skelníkových plynov, najmä emisie CO_2 zo spaľovania fosílnych palív, stále rastú.

Merania satelitov indikujú otepľovanie troposféry aj vo vyšších vrstvách ovzdušia. Rastie aj teplota oceánov, ktorá sa v 20. storočí zvýšila až do hĺbky 3 000 m približne o 0,6 °C. V súvislosti s globálnym otepľovaním dochádza k **rozkolísaniu klimatického systému**, zrážky síce rastú, ale často prichádzajú v podobe prívalových dažďov a aj v dôsledku rastúceho výparu z pôdy a rastlín sa krajina na mnohých miestach vysušuje. Rastie aj premenlivosť počasia, vrátane zvýšeného výskytu extrémnych hydrometeorologických udalostí ako sú hurikány a tajfúny, víchrice a tornáda, povodne na pobrežiach aj vo vnútrozemí, dlhotrvajúce suchá a s nimi spojené požiare (napr. nedávne megapožiare v Austrálii).

Obr. 4.5. Koala medvedíkovitá (*Phascolarctos cinereus*), ohrozený druh (kategória VU – zraniteľný). Veľkosť populácie sa odhaduje na 300 000 jedincov a jej areál sa zmenšuje. Tento stromový vačnatec sa špecializuje na konzumáciu listov eukalyptov. Keďže obsah kalórií v listoch eukalyptov je nízky, koaly sa pohybujú veľmi málo a denne prespia aj 20 hodín. Známe sú fluktuácie ich populácií, prudký pokles môže byť vyvolaný vysokým požerom listov, obdobiami horúčav a nízkych zrážok. Pri poslednom megapožiari v lete 2019 – 2020 uhynula zhruba 1/3 koál.
Zdroj: WOINARSKI & BURBIDGE 2020.
Foto: © Jan Plesník, 2014.

Katastrofické megapožiare v austrálskom lete 2019 – 2020

Od začiatku juhoaustrálskeho leta všetky štáty Austrálie na mnohých miestach sužovali početné požiare, najhoršie boli v štátoch Nový Južný Wales a Viktória, v ktorých zahynulo niekoľko desiatok ľudí. Požiare sú v Austrálii súčasťou prírodnej dynamiky, každoročne zasahujú rôzne oblasti a mnohé organizmy sú na ne adaptované (z drevín napr. eukalypty a banksie). Riadené vypaľovanie buša, s cieľom znížiť zásoby paliva pre požiare, poznali už Aborigénci a aj dnes je súčasťou manažmentu pôvodných ekosystémov.

Zmena klímy však v rekordne teplom a suchom roku 2019 prispela k nárastu priemernej teploty až o 1,5 °C (oproti priemeru rokov 1961 – 1990), pričom priemerné zrážky klesli o 40 % na 277,6 mm. Vlny letných horúčav (19. decembra 2019 na meterologickej stanici Nullarbor namerali teplotu 49,9 °C) a dlhotrvajúceho sucha sa nevyhnutne podieľajú na zvyšovaní početnosti, frekvencie a rozsahu požiarov.

Rozsah 18,6 miliónov ha spálenej krajiny (viac ako trojnásobok rozlohy SR) tohto megapožiaru je bezprecedentný a jeho intenzita mohla presiahnuť adaptačné schopnosti rastlín aj živočíchov. Podľa odhadov v priebehu týchto požiarov uhynula miliarda cicavcov, vtákov a plazov, nerátajúc ďalšie skupiny živočíchov (obojživelníky a bezstavovce), z obľúbených koál medvedíkovitých uhynula zhruba tretina.

Nevieme s istotou, či tieto megapožiare signalizujú, že klimatický systém je už blízko bodu zlomu, za ktorým sa cez kladné spätné väzby môžu spustiť nevratné a pre človeka nepriaznivé procesy. Isté je len, že zmena klímy postupuje. Ako prvé je nutné zastaviť stovky miliárd každoročných dotácií pre fosílny priemysel a ušetrené prostriedky venovať na ochranu biodiverzity, zmiernenie a adaptáciu.

Upravené podľa: DICKMAN 2020; SULLIVAN et al. 2020; AUSTRALIAN GOVERNMENT 2020

4.1.3 Zonálnosť (pásmovitosť) vegetácie

Klíma najvýraznejšie ovplyvňuje rozmiestnenie rôznych druhov a ekosystémov na Zemi. Teplota určuje rýchlosť rôznych biochemických reakcií, primárnej produktivity biomasy, rozkladu odumretej organickej hmoty a závisí od nej aj fyziologická aktivita organizmov (CHAPIN et al. 2002). A voda je pre život organizmov úplne nepostrádateľná. Pôsobenie klímy je kľúčové najmä v podmienkach terestrických ekosystémov, preto sa na kontinentoch vegetačné formácie výrazne menia v závislosti od zemepisnej šírky alebo nadmorskej výšky, hovoríme o **pásmovitosti (zonálnosti) vegetácie.**

Samotné globálne zákonitosti a vzorce (*patterns*) rozšírenia druhov sú výsledkom synergie vysokého počtu vzájomne interagujúcich faktorov, od abiotických ekologických podmienok cez biotické interakcie až po historicko-evolučný vývoj populácií jednotlivých druhov (CRIDDLE et al. 2003).

Zonálnosť vegetácie v závislosti od zemepisnej šírky

Zonálnosť (pásmovitosť) vegetácie znamená pásmovité usporiadanie nížinných suchozemských vegetačných formácií a ich podmieňujúcich faktorov (edifikátorov) v závislosti od geografickej šírky a makroklímy, bez vplyvu človeka. Makroklíma závisí od insolácie zemského povrchu a od globálnej cirkulácie atmosféry ovplyvnenej napr. rozlohou a polohou oceánov či samotných kontinentov, mohutnosťou a orientáciou veľkých pohorí, atď. Klimaxové vegetačné formácie nížinných polôh vytvárajú rozsiahle vegetačné zóny; v nich možno rozlíšiť aj plošne menšiu azonálnu a extrazonálnu (intrazonálnu) vegetáciu (KRIŽOVÁ et al. 2010).

Azonálna vegetácia sa vytvára pod vplyvom špecifických pôdnych podmienok (napr. vegetácia mokradí, slanísk, pieskov, skál) alebo vplyvom človeka (napr. vegetácia na poľnohospodárskej pôde, v hospodárskom lese alebo v rybníku). Extrazonálna (intrazonálna) vegetácia vznikla vplyvom špecifických mikroklimatických a pôdnych podmienok, podobá sa určitému typu zonálnej vegetácie, ale vyskytuje sa iba na malých plochách vnútri inej vegetačnej zóny (napr. listnaté lesy v stepnej zóne, na vlhkejších severných svahoch (KRIŽOVÁ et al. 2010).

Charakteristická zonálna vegetácia sa vyvinula v podmienkach makroklímy príslušného pásma a jeho pôd. Najznámejšiu zonáciu predstavujú **biómy** – mimoriadne rozsiahle biogeografické zóny

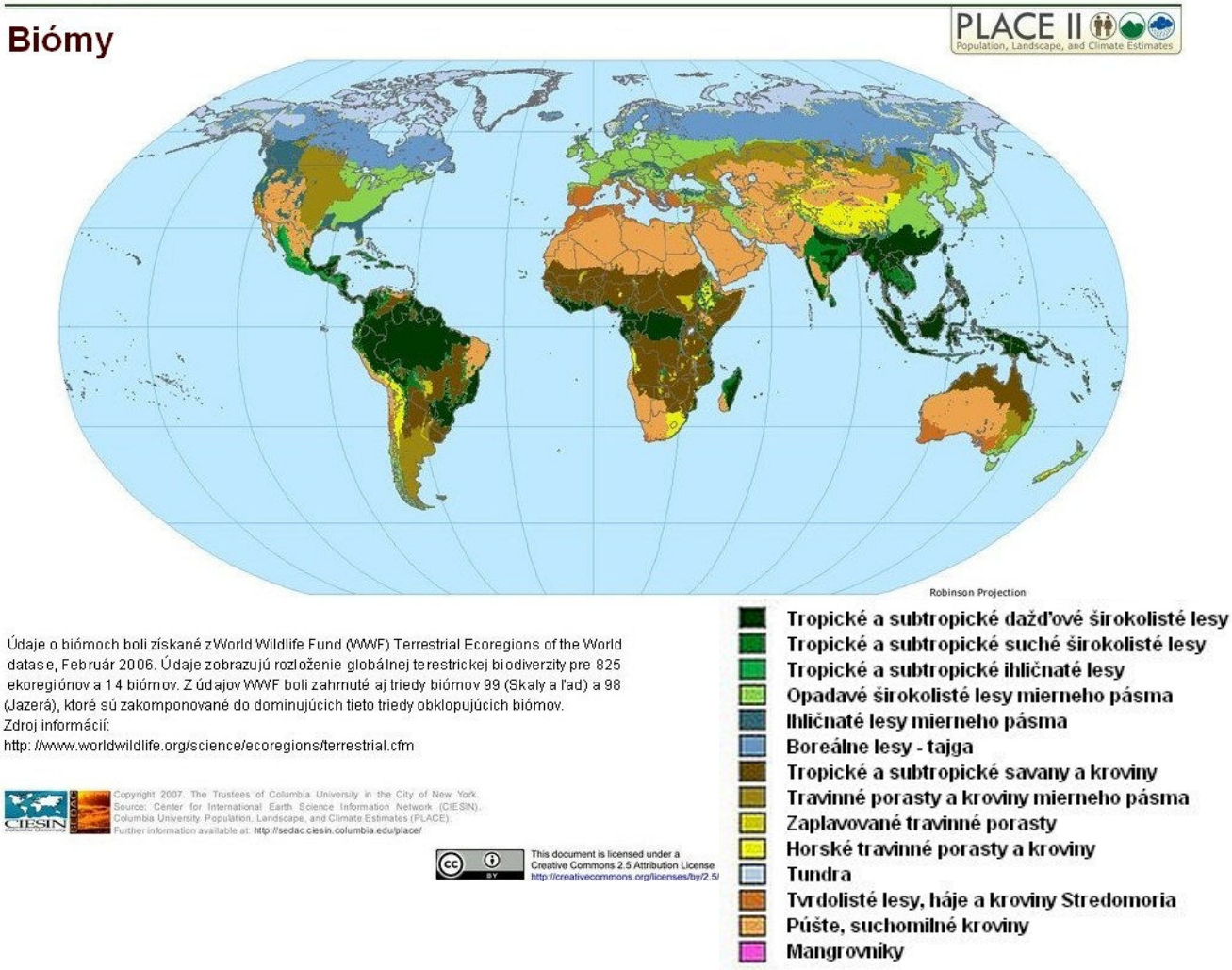
s rovnakými makroklimatickými podmienkami, ktoré charakterizuje dominantný typ prirodzenej vegetácie, s jej charakteristickou štruktúrou (napr. päť vegetačných poschodí tropického dažďového pralesa), ako aj typické a špecifické adaptácie druhov k prostrediu.

Terestrické **biómy sú ekosystémy vysokej hierarchickej úrovne**, ktoré odrážajú prevládajúci charakter klímy. Ich tvar a smer je iba približne rovnobežkový, avšak klímu výrazne ovplyvňuje aj topografia terénu, najmä hory, veľkosť pevniny a vo významnej miere aj činnosť človeka: predovšetkým likvidácia, degradácia alebo iné zmeny pôvodných ekosystémov (PRACH et al. 2009). Klasifikácie zonálnosti vegetácie sú rôzne: nižšie uvedené staršie členenie rozlišuje 9 terestrických biómov, kým WWF ich definuje 14 (obr. 4.6) a iné členenia uvádzajú až 18 biómov.

WALTER (1970 in KRIŽOVÁ et al. 2010) a CAIN et al. (2014) rozlišujú tieto makroklimaticky podmienené **vegetačné zóny – biómy**:

- **Rovníková zóna vždy zelených tropických dažďových lesov** (medzi 10° N a S – severnej a južnej geografickej šírky). Priaznivá klíma – najmä stabilná ročná teplota a zrážky minimálne 2 000 mm ročne, aj vysoký prísun slnečnej energie po celý rok tu viedli k vývoju zložitých 5 etážových vegetačných vrstiev. Tropické dažďové pralesy majú vysokú produktivitu a vysoký objem biomasy. Sú to tiež oblasti mimoriadne vysokej biodiverzity, obýva ich minimálne polovica všetkých druhov Zeme. Tieto pralesy čelia vysokému odlesňovaniu, planéta už stratila viac ako polovicu ich rozlohy.
- **Tropická zóna sezónnych lesov a saván**, ktorú charakterizuje striedanie sezón výrazného sucha a letných dažďov, zahŕňa listnaté opadavé tropické lesy, háje tŕnitých drevín a tropické savany (medzi 10° – 23,5° N a S). Ročné úhrny zrážok dosahujú v sezónnych lesoch 1000 – 2 000 mm, na savane podstatne menej, v období sucha je to mesačne menej ako 60 mm. Vysoký prísun slnečnej energie spôsobuje, že v období dažďov dochádza k veľmi rýchlej obnove bohatej vegetácie. Typický vzhľad udržiavajú aj obrovské stáda kopytníkov, najmä zebier, antilop a slonov. Človek už viac ako polovicu tejto zóny premenil (najmä na poľnohospodársku pôdu, plantáže a zástavbu).
- **Zóna subtropických polopúští a púští** (zhruba okolo 30° N a S) – zostup suchého vzduchu v Hadleyho bunkách, okrem subtrópov ich nájdeme aj v miernom pásme v oblastiach s extrémnou kontinentalitou, v dažďovom tieni vysokých pohorí, s vysokými teplotami, vysokou evapotranspiráciou a extrémne nízkymi zrážkami. Nízka dostupnosť vody pre organizmy viedla ku konvergentnej evolúcii sukulentov, ktoré v pletivách zadržiavajú vodu. Kým abundancia organizmov je tu veľmi nízka, druhová diverzita môže byť vysoká, napr. v Sonoranskej púšti rastie až 4 500 druhov rastlín. Polopúšte človek oddávna využíval na pastvu dobytka a zavlažovanie púští umožňuje aj pestovať plodiny.
- **Zóna tvrdolistej, vždyzelenej vegetácie** riedkych lesov a krovín (medzi 30° a 40° N a S) , s typickou stredomorskou klímou so zimnými dažďami a suchou, horúcou jarou, letom a jeseňou. Vždyzelené listy znižujú nároky rastlín na živiny a hrubšia vrstva kutikuly (sklerofytná, etéziová vegetácia) na ich povrchu bráni zvýšenému výparu vody aj pred herbivormi. K prírodnej dynamike tu patria aj pravidelné požiare a charakteristická je aj vysoká biodiverzita. Vzhľadom k ľudskému osídleniu Stredomoria už v staroveku je tento región silne poznačený výrubmi lesov, eróziou pôdy a pod.
- **Nemorálna (lesná) zóna s listnatými opadavými lesmi** a zmiešanými ihličnato-listnatými lesmi, (medzi 30° a 50° N a S), s miernou klímou a zrážkami 500 až 1 500 mm ročne. Opadavosť listov je adaptáciou na zimné mrazy, ich každoročnú obnovu umožňuje dostatok živín v pôde. Na každom kontinente tvoria hlavné dreviny duby, buky a javory. Druhová diverzita a objem nadzemnej biomasy sú nižšie ako v tropických pralesoch, ale relatívne vysoké. Veľká časť tohto biómu bola v minulosti odlesnená kvôli získavaniu dreva, poľnohospodárskej pôdy a výstavbe sídel.
- **Teplá temperátna vegetačná zóna vždyzelených lesov** (medzi 45° a 50° N a S). Zväčša ju charakterizuje blízkosť oceánov a teplá a vlhká klíma, ale lesy (mierne mrazuvzdorné) môžu siahať až do vnútrozemia a zrážky sa môžu meniť od 500 do 4 000 mm ročne. Lesy v blízkosti oceánu charakterizuje vysoká produkcia biomasy (napr. sekvojové lesy v Severnej Amerike) a na južnej pologuli aj pomerne vysoká diverzita stromov. Keďže tieto lesy poskytujú kvalitné drevo, výrazne ich poznačili rozsiahle výruby a zmena druhovej skladby drevín (smerom k rýchlo rastúcim druhom).

- **Kontinentálna zóna prevažne aridnej a mrazuvzdornej travinnej vegetácie** (medzi 30° a 50° N a S), s miernou klímou, ktorú charakterizujú teplé a daždivé letá a studené a suché zimy. Tento bióm zahŕňa predovšetkým stepi (v Severnej Amerike prérie, v Južnej Amerike pampy, v Južnej Afrike veldy), na jeho okrajoch aj lesostepi, v malej miere tiež polopúšte a púšte mierneho pásma. V tých oblastiach prérií, kde sú zrážky vyššie, vytvoreniu lesných porastov bránili časté požiare a predovšetkým spásanie veľkými herbivormi (napr. bizónmi). Ide o najviac zmenený bióm na Zemi, najmä v dôsledku premeny jeho podstatnej časti na oráčiny, na intenzívne pastviny, ale aj sídelnou zástavbou.
- **Zóna tajgy, t. j. boreálnych ihličnatých lesov**, sa tiahne v širokom pásme severnej pologule (medzi 50° – 65° N), s chladnou klímou (mrazové obdobie trvá až do 6 mesiacov) a nízkymi zrážkami. Lesy rastú na prevažne kyslých podzolových pôdach. Pravidelne zamŕzajú, čo viedlo k vývoju permafrostu. V letnom období vznikajú aj požiare. Ide o najmladší lesný bióm s jednoduchou štruktúrou a nízkou biodiverzitou, z lesov najmenej človekom dotknutý, ale situácia sa rýchlo mení v dôsledku rastúcich výrubov dreva a ťažby fosílnych palív, ako aj v dôsledku zmeny klímy.
- **Zóna arktickej tundry** (nad 65° N a S) s veľmi chladnou klímou a nízkymi zrážkami. Tento ekosystém bez stromov charakterizuje mozaika rozmanitých travinných a nízkych krovinových spoločenstiev, dôležité sú aj porasty machov a lišajníkov, veľmi početné sú tiež mokrade. Krátke vegetačné obdobie čiastočne kompenzujú dlhé letné dni, hniezdi tu mnoho druhov sťahovavých vtákov. Ľudské osídlenie je riedke, avšak vplyv človeka rastie v dôsledku ťažby fosílnych palív. V tomto bióme sa tiež výrazne prejavuje zmena klímy – teploty tu oproti priemeru vzrástli až dvojnásobne.



Obr. 4.6. Mapa svetových biómov Zeme z roku 2007. *Autor:* Center for International Earth Science Information Network, Columbia University: PLACE III, Population, Landscape and Climate Estimates, v3: Biomes, Global. Creative Commons BY 2.5., world-biome-map-columbia-nasa-wwf/ https://www.flickr.com/photos/54545503@N04/5485516989; *Upravené: preklad legendy*

Biómy môžeme členiť na menšie celky – napr. ekoregióny. **Ekoregión** je rozsiahla ekologicky a geograficky definovaná oblasť, menšia ako bióm, ktorá obsahuje zreteľne odlíšené a pre daný ekoregión charakteristické zoskupenia spoločenstiev a druhov. OLSON et al. (2001) určili **867 terestrických a 232 morských ekoregiónov Zeme**. Inými vyššími jednotkami biogeografického členenia (ktoré sú však značne nejednotne používané) pre pomerne rozsiahle územia s charakteristickou vegetačnou stupňovitosťou a so svojráznymi druhmi rastlín, húb a živočíchov žijúcich v charakteristických ekologických podmienkach sú biogeografická provincia, biogeografická oblasť, biogeografický región a biogeografická zóna.

Výšková zonálnosť vegetácie (vegetačná stupňovitosť)

Približne 25 % zemského povrchu zaberajú horské oblasti (CAIN et al. 2014). Na svahoch hôr môžeme pozorovať **výškovú vegetačnú stupňovitosť (vegetačné výškové stupne)**. Ide o vertikálne rozvrstvenie vegetačných stupňov, ktoré súvisí so zmenou nadmorskej výšky, makro- a mezoklímy. Prirodzená odlišnosť a charakteristické druhové zloženie pôvodnej vegetácie jednotlivých horizontálnych úsekov je spôsobené vertikálnou členitosťou územia, rozdielmi v súbore klimatických faktorov (napr. teplota ovzdušia, zrážky, insolácia atď.) a geomorfológie (mohutnosť pohorí, orientácia svahov atď.). Vo vertikálnom smere je výrazný najmä gradient klimatických charakteristík, osobitne ročný úhrn a časová distribúcia zrážok, počet dní so snehovou pokrývkou, sila a smer vetrov, teplota (v našich zemepisných šírkach klesá v priemere o 0,64 °C na každých 100 výškových metrov) a atmosférický tlak.

Prechod medzi vegetačnými stupňami je však postupný. Dôsledkom silných gradientov teploty, zrážok, rýchlosti a smeru vetrov na svahoch a v údoliach horských masívov je, že šírka vegetačných stupňov je o niekoľko rádov menšia ako šírka vegetačných pásov (KRIŽOVÁ et al. 2010) a vo vyšších polohách sú spoločenstvá izolovanejšie. Kým prechody medzi biómami sú pozvoľné, prechody medzi vegetačnými stupňami sú pomerne zreteľné (napr. horná hranica lesa). Keďže s rastúcou geografickou šírkou postupne klesá oslnenie, hranice výškových vegetačných stupňov sa posúvajú smerom nadol.

Výškové vegetačné stupne na Slovensku

nížinný: do 200 (300) m n. m., prevláda kultúrna krajina, typické sú zvyšky lužných lesov a teplomilné dúbravy, charakteristická je aj nelesná vegetácia na pieskoch, slaniskách a zaplavovaných lúkach;

pahorkatinový: 200 – 500 (700) m n. m., prevládajú dubové a dubovo-hrabové lesy; na menších plochách sutinové lesy, z nelesnej vegetácie tu majú ťažisko výskytu subxerotermofilné travinové spoločenstvá, kosné lúky a lemové spoločenstvá;

podhorský: 500 – 900 (1000) m n. m., geomorfologicky rôznorodý, prevládajú bučiny a bukové jedliny, z nelesnej vegetácie tu majú ťažisko výskytu slatinné lúky a podhorské kosené lúky a pasienky;

horský: 900 – 1400 (1550) m n. m., prevládajú smrekové lesy, miestami presahujú bučiny a jedliny z podhorského stupňa, nachádza sa tu tiež horná hranica lesa, z nelesnej vegetácie tu sú určité typické horské travinno-bylinné spoločenstvá, vysokobylinné nivy a horské pasienky;

subalpínsky: 1400 – 1800 m n. m., prevládajú pôvodné porasty kosodreviny, na svahoch opäť učité typické subalpínske travinno-bylinné spoločenstvá a pasienky, na vlhších miestach vysokobylinné nivy;

alpínsky: (1600) 1800 – 2300 m n. m., prevládajú pôvodné alpínske travinné porasty, miestami nízke kríky, špecifické spoločenstvá sú tiež viazané na vlhké žľaby, snehové výležiská a skeletnaté pôdy;

subniválny: nad 2300 m n. m., prevláda skalný substrát, tento stupeň je bez súvislého vegetačného krytu, vyššie rastliny sú tu iba rozptýlene, na skalách je bežný výskyt lichenizovaných húb (lišajníkov).

Zdroj: JAROLÍMEK & HROUDA 2019.

Okrem tejto klasifikácie je v strednej Európe prepracovaná a zaužívaná aj lesnícka klasifikácia vegetačných stupňov: od dubového stupňa cez bukovo-dubový, dubovo-bukový, bukový, jedľovo-bukový, smrekovo-bukovo-jedľový, smrekový a kosodrevinový stupeň (nad hornou hranicou lesa), ktoré sú nasledované dvomi nelesnými stupňami: alpínskym a subniválnym (KRIŽOVÁ et al. 2010).

Vegetačné zóny a vegetačné stupne v kontexte zmeny klímy

Na zmenu klímy, ktorá sa prejavuje predovšetkým rastom priemernej teploty, teplotných extrémov aj meniacou sa distribúciou zrážok v priestore aj čase, budú mnohé druhy nútené odpovedať ich adaptáciami na nové podmienky. Adaptácie jednotlivých druhov sú a budú veľmi rôzne, čo sa prejaví zmenami druhového zloženia jednotlivých ekosystémov a početnosti jednotlivých taxónov. **Jednotlivé druhy na zmenu klímy reagujú najmä nasledovne** (PULIDO & BERTHOLD 2004; VISSER & BOTH 2005):

1) priestorovou zmenou veľkosti a posunom ich areálov smerom k vhodným podmienkam, problém môžu mať najmä dlhoveké imobilné organizmy stredných a vyšších sukcesných štádií (napr. rôzne druhy drevín);
2) časovým posunom ich fenologických fáz vyrovnávajúcim vplyvy zmeny klímy, problémom je tu však už dnes pozorovaná desynchronizácia fenologických fáz medzi druhmi, ktorá narúša medzidruhové interakcie (jej následky sme už priblížili v kap. 2.2);
3) mikroevolúciou, ktorá spočíva v morfologickej, fyziologickej, fenologickej a behaviorálnej adaptácii, problémom je tu rýchlosť zmeny klímy, ktorú evolúcia jednotlivých druhov nemusí stíhať (vo výhode tu sú druhy, ktoré majú širšiu fenotypovú plasticitu).

Tieto adaptácie sťažuje aj synergické pôsobenie ďalších faktorov, ktoré vedú k úbytku biodiverzity, ako sú najmä strata, degradácia a fragmentácia biotopov a populácií, rozsiahle znečisťovanie prostredia rozmanitými polutantami, zmena krajiny a zníženie jej vodozdržnej kapacity, najmä v dôsledku priemyselného poľnohospodárstva a rozsiahleho globálneho odlesňovania, šírenia inváznych druhov a pod. Najmä adaptácie oslabených populácií ohrozených druhov nemusia stíhať rýchlosť klimatickej zmeny. Prognostická štúdia hodnotiaca súbežné vplyvy zmeny klímy a zmeny využívania krajiny hovorí, že zásadné zmeny sa môžu dotknúť až 38 – 80 % nezaľadneného povrchu kontinentov (OSTBERG et al. 2018). V Európe zmena klímy ohrozuje až 14 % biotopov a 13 % druhov európskeho významu (EEA 2017).

V dôsledku zmeny klímy sa budú meniť a posúvať areály druhov a spoločenstiev, ale aj jednotlivé vegetačné zóny a stupne, čo je dnes už pozorované. Globálne počítačové modely prognózujú pre 21. storočie **posun vegetačných pásiem** až o niekoľko sto km smerom od rovníku k vyšším zemepisným šírkam a regionálne modely **posun vegetačných stupňov** o desiatky až niekoľko sto metrov do vyššej nadmorskej výšky, pričom tieto zmeny budú rásť smerom k pólom a k vyšším vegetačným stupňom (IPCC 2007, 2019; GONZALES et al. 2010; EEA 2012, 2017; GARAMVÖLGY & HUFNAGEL 2013; MACHAR et al. 2017).

V dôsledku posúvania vegetačných pásiem sa najväčšie zmeny biotopov očakávajú v arktickej tundre, kde hrozí rozsiahle rozsiahle vysychanie mokradí. Do konca 21. storočia tu má prísť k strate 2/3 rašelinísk na topiacom sa permafroste, čo povedie k zvýšeniu emisií CO_2 z vysychajúcej a rozkladajúcej sa rašeliny a k prudkému nárastu emisií metánu (CH_4), ktorého obrovské množstvá sú viazané v permafroste (EEA 2012, 2017). Prognózovaný je aj výrazný posun severnej hranice boreálnych lesov na sever, kým naopak z juhu budú vytláčané listnatými drevinami. Tento posun výrazne zmenší rozsah súčasnej lesotundry a tundry a tým aj priestor pre mnohé druhy tu hniezdiacich vtákov. Samotné boreálne lesy budú ohrozovať častejšie periódy sucha a s nimi spojené početné a rozsiahle požiare ako aj gradácie populácií podkôrneho, listožravého a drevokazného hmyzu. Napr. lykožrút *Dendroctonus ponderosae* a ďalší podkôrny hmyz už zdevastoval milióny hektárov lesov v Kanade a USA, len v západnej Kanade je ním napadnutých viac ako 20 miliónov ha (DHAR et al. 2016). Aj v oblastiach nízkych zemepisných šírok a v tropických regiónoch môžu nastať vážne problémy v dôsledku vynárania sa nových klimatických podmienok, vedúcich k vysúšaniu krajiny (GARAMVÖLGY & HUFNAGEL 2013; IPCC 2019).

Modelovaním zmien vegetačnej stupňovitosti v dôsledku zmeny klímy sa v strednej Európe (mimo alpského regiónu) zaoberali napr. ŠVAJDA et al. (2011), ktorí skúmali posun hornej hranice kosodrevinovej vegetácie v Tatrách a MACHAR et al. (2017), podľa ktorých možno v Českej republike očakávať nárast plôch území s podmienkami nižších vegetačných stupňov a naopak, radikálne zníženie rozsahu plôch 6. až 8. vegetačného stupňa, ktoré charakterizuje chladnejšia a vlhkejšia klíma. Tento posun veľmi nepriaznivo ovplyvní možnosti pestovania niektorých lesných drevín, najmä smreka.

Podobný vývoj sa očakáva aj na Slovensku, kde sú zmenou klímy najviac ohrozené práve lesné ekosystémy, z nich predovšetkým smrekové lesy (podrobnejšie sa tomuto problému venujeme v kap. 7.2.), ktoré už v súčasnosti aj najviac čelia nárastu frekvencie a intenzity víchric a tým aj veterných polomov. Víchrice, častejšie vlny horúčav a periód dlhotrvajúceho sucha (s vyšším rizikom požiarov), fyziologické oslabenie stromov znižujúce ich odolnosť voči napadnutiu hospodárskymi škodcami alebo patogénmi, sa však nevyhnú ani podhorskému či ešte nižším vegetačným stupňom (MŽP SR 2018).

Nepriaznivé dôsledky súčasnej klimatickej zmeny sa neobmedzujú iba na dreviny. Podľa rozsiahlej štúdie jej vplyvov na 2 632 horských a vysokohorských rastlín Európy (ENGLER et al. 2011), v závislosti od klimatického scenára až 36 – 55 % alpínskych druhov, 31 – 51 % subalpínskych druhov a 19 – 46 % horských druhov môže prísť až o 80 % ich súčasného biotopu. Horské a vysokohorské druhy rastlín a živočíchov sú ohrozené na našom území o to viac, že rozloha alpínskeho stupňa je u nás pomerne malá a možnosti migrácie ich rastlinných a živočíšnych druhov do vyšších polôh sú preto značne obmedzené.

Zmena klímy ohrozuje aj azonálne ekosystémy, predovšetkým mokrade, ktoré čelia riziku vysychania. Riečne ekosystémy zas budú negatívne ovplyvňované zníženým prietokom aj rastom teploty.

4.2 Termodynamické zákony a ich implikácie

Termodynamika je odbor fyziky, v ktorom sa skúmajú otázky šírenia tepla, tokov a transformácií energie v systémoch. Termodynamické princípy sa dnes okrem techniky stále viac aplikujú aj v biológii, ekológii a environmentalistike, v sociálnych aj ekonomických vedách. Štyri empiricky získané zákony definujú základné fyzikálne charakteristiky správania termodynamických systémov. Považujeme za dôležité aspoň rámcovo uviesť dva najdôležitejšie – prvý a druhý termodynamický zákon, ktoré zásadne prispievajú k porozumeniu organizácie a správania organizmov a ekologických systémov (SCHNEIDER & KAY 1994).

4.2.1 Prvý termodynamický zákon a jeho environmentálne implikácie

Nevyhnutnou **podmienkou existencie života na Zemi** je kontinuálny tok slnečnej energie. Táto ohrieva zemský povrch, od neho sa ohrieva atmosféra, značnú časť energie akumulujú oceány, je potrebná pre výpar vody a poháňa globálnu cirkuláciu atmosféry (a tým aj horizontálny transport energie). Prostredníctvom fotosyntézy slnečnú energiu zachytávajú a transformujú fotosyntetizujúce organizmy (najmä zelené rastliny a riasy) a následne prechádza (a transformuje sa) v ekosystémoch cez pastevnokoristnícke trofické reťazce. Energiu odumretej organickej hmoty konzumujú a transformujú organizmy v detritových reťazcoch, ktorých prvú trofickú úroveň predstavujú detritivory a dekompozitory.

Prvý termodynamický zákon

Podľa zákona o zachovaní energie sa celková energia v izolovanej fyzikálnej sústave nemení, to znamená, že energia nevzniká ani nezaniká, môže sa iba meniť z jednej formy na inú. **Prvý termodynamický zákon** je v podstate adaptáciou zákona o zachovaní energie pre termodynamické procesy: pri žiadnych fyzikálnych a chemických procesoch energia nemôže vznikať ani zanikať, iba sa môže meniť z jednej formy na inú. Veľkosť tejto zmeny je určená tokom tepla a vykonanej práce.

Prvý termodynamický zákon je možné vyjadriť rovnicou $\Delta U = Q - W$, kde ΔU je zmena vnútornej energie (U) systému, Q je zvonka dodané teplo a W je práca vykonaná systémom (KREMPASKÝ 1982). V prípade, ak W označuje prácu dodanú do systému zvonku, mení sa vo vzorci pri tejto veličine znamienko: $\Delta U = Q + W$. (Tieto rovnice neplatia v prípade jadrových reakcií, kedy sa na energiu mení malá časť hmoty.) Keďže žiaden pohyb nie je možný bez energie a keďže tento pohyb môže prebiehať iba v priestore a v čase, vďaka transformáciám energie vnímame aj plynutie času (WALL 2004).

Závažným dôsledkom pre živé systémy je podmienka, že aby ľubovoľný biologický alebo ekologický systém mohol existovať, vyvíjať sa a reprodukovať, musí byť **termodynamicky otvorený**, t.j. otvorený

k viac – menej neustálym tokom energie cez jeho hranice (JØRGENSEN et al. 2007). Bez prísunu energie a jej transformácie (napr. vo fotosyntetizujúcich organizmoch – zachytávanie fotónov slnečnej energie a jej transformácia na energiu chemických zlúčenín alebo v konzumentoch – získavanie energie z potravy) žiaden živý systém neudrží svoju štruktúru a v nej prebiehajúce procesy, a postupne sa rozpadá.

Zákon zachovania energie limituje udržateľné využívanie biologických zdrojov

Keďže energia nemôže vznikať z ničoho, primárna (a tým aj sekundárna) produkcia ekosystémov má limity dané oslnením povrchu, dostatkom vlahy, efektívnosťou fotosyntézy a ďalšími faktormi. Ilustráciou ich prekročenia je napr. **nadmerné spásanie fytomasy** hospodárskymi zvieratami (vedúce k degradácii pasienkov zvýšenou eróziou a vysokým prísunom živín v exkrementoch), nadmerný lov a rybolov. Vo viacerých druhovo bohatých tropických oblastiach Konga, Indonézie, Amazónie a iných je v dôsledku intenzívneho lovu pozorovaný výrazný úbytok veľkých zvierat, predovšetkým cicavcov (vrátane primátov), čo vedie k tzv. **prázdnemu lesu** (PRIMACK et al. 2011). Hybnou silou ilegálneho lovu týchto zvierat je nárast korupcie, vojnových konfliktov, ale tiež v stále väčšej miere aj liberalizácia obchodu (osobitne vysoký export rybieho mäsa z prímorských štátov Afriky **núti miestne obyvateľstvo viac využívať iný zdroj energie a proteínov** – v podobe zveriny pralesov a saván (PRIMACK et al. 2011).

Lov veľkých cicavcov v tropických lesoch a na savanách

Objem lovu mäsa suchozemských voľne žijúcich živočíchov v trópoch (*bushmeat*), predovšetkým veľkých cicavcov (najmä primátov, párnokopytníkov, netopierov, hlodavcov a šeliem), ale aj vtákov a plazov, prešiel od polovice minulého storočia z podporného charakteru do silne komerčných aktivít. V súčasnosti dosahuje najmenej šesť miliónov ton ročne a sústreďuje sa na západnú a strednú Afriku (predovšetkým na zalesnenú oblasť povodia Konga), ale tiež na juhovýchodnú Áziu a Amazóniu (aj tu už bola biomasa 12 druhov najviac zraniteľných lovom zredukovaná až o neuveriteľných 90 %).

Mäso veľkých cicavcov a vtákov predstavuje významný zdroj bielkovín pre milióny Afričanov. Kým lovené vtáky spotrebovávajú zväčša rodiny lovcov, mäso lovených cicavcov slúži najmä k obchodu (čo sa týka až 90 % mäsa cicavcov lovených v tropických dažďových pralesoch strednej Afriky). Za zvyšovaním dopytu po mäse stoja skôr bohatšie vrstvy obyvateľov miest, ktorí považujú takéto mäso za zdravšie, než mäso z hospodárskych zvierat a medzinárodný obchod. K prudkému rastu tohto lovu prispieva aj šírenie moderných strelných zbraní, ľahšia mobilita lovcov a paradoxne aj odlesňovanie.

Lov veľkých zvierat patrí k hlavným priamym hybným silám straty biodiverzity v trópoch, kde dochádza k častým miestnym vyhynutiam a k „*vyprázdňovaniu ekosystémov*“ aj v nenarušených lesoch a na savanách. Kým niektoré druhy znášajú lovecký tlak prekvapivo dobre, najmä u veľkých zvierat s nízkou reprodukčnou schopnosťou môže byť aj odber pomerne malej časti populácie zničujúci. V rozvojových štátoch je týmto lovom ohrozených 301 druhov suchozemských cicavcov.

Lov voľne žijúcich živočíchov v trópoch bol po tisícročia dôležitým zdrojom proteínov pre miestnych ľudí, ale jeho súčasný objem je neudržateľný. Len 2 % lovených ohrozených druhov vykazujú stabilnú alebo rastúcu početnosť. V priemere iba 10,5 % areálu ohrozených druhov leží v chránených územiach, kde však narastá tlak pytliakov (v dôsledku úbytku lovených zvierat mimo chránených území). Úbytok lovených zvierat tiež vedie k ďalším zmenám ekosystémov, ich funkcií a ekosystémových služieb.

Lov voľne žijúcich zvierat a konzumácia ich mäsa tiež zvyšuje riziko prenosu rôznych ochorení zo zvierat na človeka (napr. vírusy eboly, HIV, vtáčej chrípky aj nový koronavírus spôsobujúci ochorenie COVID-19). Nadmerný lov voľne žijúcich živočíchov vedie k strate významného zdroja bielkovín a príjmov chudobných ľudí na vidieku a tiež s tým spojeným miznutím kultúrnych tradícií.

Riešenie problému si nevyžaduje iba prísnu ochranu ohrozených lovených druhov, ale aj podporu práv miestnych komunít mať úžitky z tradičného, ale udržateľného lovu, orientáciu lovu na odolnejšie druhy a zabezpečenie alternatívnych zdrojov bielkovín pre obyvateľov rozvojových štátoch, najmä na báze produkcie rastlinných bielkovín alebo konzumácie druhov z nižšej úrovne potravných reťazcov, najmä hmyzu.

Upravené podľa: VAN VLIET et al. 2010; NASI et al. 2011; SWAMY & PINEDO-VASQUEZ 2014; FA et al. 2015; JELÍNKOVÁ et al. 2015; PETROZZI et al. 2016; RIPPLE et al. 2016; WILKIE et al. 2016; BENÍTEZ-LÓPEZ et al. 2017; IPBES 2019

Analogickým problémom k lovu v pralesoch je **intenzívny rybolov**, v niektorých morských ekosystémoch sa biomasa rýb znížila o 90 až 99 % (REID et al. 2005). Rybolov je dnes biologicko-priemyselným odvetvím, čo ilustrujú obrovské flotily a plávajúce továrne na spracovanie rýb. Intenzívny výlov mnohých druhov rýb prekračuje možnosti prirodzenej obnovy ich populácií. Navyše veľká časť objemu ulovených organizmov sa vracia do mora (podľa niektorých zdrojov až 40 %), mnohé z nich sú zranené sieťami a následne uhynú. Prvý termodynamický zákon hovorí jasne, že **konzumácia biotických prírodných zdrojov človekom nemôže narastať donekonečna**, ak tieto zdroje nemajú úplne zdegradovať.

Zákon zachovania energie limituje aj obnoviteľné zdroje energie, najmä biopalivá

Iným príkladom je hodnotenie udržateľnosti ekonomiky spoločnosti z pohľadu jej energetickej náročnosti a dostupných zdrojov. Hospodárstva priemyselne rozvinutých krajín predstavujú systémy s extrémne vysokými a stále rastúcimi vstupmi hmoty aj energie. Globálny priemer spotreby energie na osobu je dnes najmenej 50 násobný oproti spotrebe lovcov - zberačov (MUYS 2013). Tento nárast je dnes krytý najmä rastom spotreby fosílnych palív, čo vedie aj k rastu znečistenia. Zabezpečenie našich energetických potrieb si preto vyžaduje hľadať jej nové, **obnoviteľné zdroje energie (OZE)**.

Najmä v posledných dvoch desaťročiach k nedomysleným hitom dotovaných OZE patrí aj biomasa. Ukážkou sú najmä **biopalivá**, t.j. palivá vyprodukované z biomasy alebo z biologického odpadu, používané najmä ako kvapalné alebo plynné palivá v doprave. V súčasnosti prevažujú biopalivá 1. generácie, osobitne bioetanol a bionafta (na báze rastlinného oleja). Na jednej strane ich spaľovanie produkuje lokálne menej emisií a tým nižšiu entropiu ako v prípade fosílnych palív. Na druhej strane ich produkcia výrazne zvyšuje priemernú globálnu ekologickú stopu, pretože pestovanie kultúr rastlín vhodných na výrobu biopalív si v mnohých prípadoch vyžaduje **likvidáciu obrovských území divočiny**, predovšetkým tropických pralesov a mokradí, najmä rašelinísk (GAO et al. 2011). Táto likvidácia v konečnom dôsledku znamená násobne zvýšenú destabilizáciu klimatického systému, tak v dôsledku zvýšeného uvoľňovania emisií (pri klčovaní pralesov a po odvodňovaní rašelinísk) ako aj straty významných ekosystémových služieb v podobe zníženej absorbcie uhlíka, oslabenej regulácii vodného cyklu a tým aj klímy.

Dramatickým príkladom je **likvidácia tropických dažďových pralesov** na ostrovoch Borneo a Sumatra a na Malajskom polostrove, kde sú v rozsahu miliónov ha nahrádzané plantážami palmy olejovej (*Elaeis guineensis*) – obr. 4.7. Lisovaním jej plodov sa získava palmový olej, ktorý napr. Európska únia importuje predovšetkým za účelom produkcie bionafty. Natieranie takýchto biopalív *„na* zeleno“ teda

Obr. 4.7. a) Odlesňovanie tropických pralesov na Sumatre, b) za účelom rozširovania plôch pre plantáže palmy olejovej. Indonézia a Malajzia zabezpečujú spolu viac ako 80 % svetovej produkcie palmového oleja, cenou za jeho produkciu je dramatické odlesňovanie a s ním spojený úbytok biodiverzity.
Foto a: Hayden, 2007. *Zdroj:* Oil Palm Concession, Flickr, Creative Commons BY 2.0, https://en.wikipedia.org/wiki/Deforestation_in_Indonesia#/media/File:Riau_palm_oil_2007.jpg;
Foto b: Achmad Rabin Taim Jakarta, 2008. *Zdroj:* P3260481, Flickr, Creative Commons BY 2.0, https://en.wikipedia.org/wiki/Palm_oil_production_in_Indonesia#/media/File:Oil_palm_plantation_in_Cigudeg-03.jpg

znamená rozsiahlu likvidáciu pralesov a s nimi aj biotopov mnohých ohrozených druhov ako sú napr. orangutan bornejský (*Pongo pygmaeus*), orangutan sumatriansky (*Pongo abelii*), tiger sumatriansky (*Panthera tigris sumatrae*), nosorožec sumatriansky (*Dicerorhinus sumatrensis*) a iné (GREAT APE TRUST OF IOWA 2008). Navyše, premena tropických pralesov na plantáže znižuje absorpciu CO_2 a tým prispieva k ďalšiemu nárastu koncentrácie tohto najvýznamnejšieho skleníkového plynu v atmosfére. Navyše, časť dažďových pralesov v Indonézii a Malajzii leží na mnohovrstvovej vrstve rašeliny, ktorá sa po vyrúbaní pralesov odvodňuje, keďže palme olejovej silne zamokrená pôda nevyhovuje. V dôsledku následného vypaľovania a rozkladu rašeliny sa tu do ovzdušia emitujú ďalšie obrovské množstvá CO_2.

Výroba biopalív z domácich zdrojov v Európe a v Severnej Amerike zas prispieva k drancovaniu lesov a ohrozuje aj cenné biotopy v poľnohospodárskej krajine (napr. remízky a brehové porasty). Vo Veľkej Británii a v Holandsku sa spaľujú drevené pelety dovážané až z USA, pochádzajúce z tamojších lesov. Aj na Slovensku dotačná politika podporujúca OZE prispela v poslednom desaťročí k drancovaniu lesov. V elektrárňach na štiepku sa neraz spaľovalo kvalitné drevo, proti čomu dlhodobo protestovali mimovládne environmentálne zamerané organizácie, predovšetkým Lesoochranárske zoskupenie Vlk, ktorému sa v decembri 2018 podarilo dosiahnuť, že Národná rada Slovenskej republiky tieto dotácie zastavila.

Vplyvy biopalív 1. generácie na životné prostredie

Biopalivá sa široko používajú najmä za účelom lokálneho zníženia emisií z dopravy. Avšak produkcia biopalív, až na výnimky (napr. ich produkcia z odpadu), nie je taká „zelená“ ako na prvý pohľad vyzerá. Švajčiarska štúdia 26 druhov biopalív, vrátane bioetanolu a bionafty, naznačila, že mnohé z nich síce majú o 30 – 50 % nižšie priame emisie skleníkových plynov, ak však berieme do úvahy celý životný cyklus ich produkcie, transportu a spaľovania, potom môžu mať závažnejšie dopady na životné prostredie ako fosílne palivá.

Najväčšia časť emisií skleníkových plynov spojených s produkciou biopalív súvisí s používaním mechanizácie, priemyselne vyrábaných hnojív a pesticídov a s emisiami skleníkového plynu oxidu dusného (N_2O, pričom otepľujúci potenciál jeho molekuly je 265 – 295-krát vyšší ako v prípade molekuly CO_2). Oveľa závažnejšie sú však emisie vyvolané zmenou krajinnej pokrývky, najmä v prípade masívneho odlesňovania tropických dažďových pralesov (emisie zo spaľovania biomasy a úbytok kapacity krajiny absorbovať CO_2).

Zničením prírodných biotopov a ich premenou na polia a plantáže pre pestovanie plodín na výrobu biopalív sa do ovzdušia uvoľňuje mnohonásobne viac emisií oxidu uhličitého (CO_2), než koľko sa ročne ušetrí nahradením fosílnych palív biopalivami pestovanými na rovnakej ploche. Bilancia uhlíka sa pri produkcii bioetanolu z cukrovej trstiny z plantáží na mieste niekdajšej savany v Brazílii vyrovná za 17 rokov, pri výrobe z kukurice po konverzii trávnych porastov v USA je to 93 rokov (podľa inej štúdie až 167 rokov), v prípade produkcie produkcie bionafty zo sóje na mieste vyrúbaného tropického dažďového pralesa v Amazónii je to až 319 rokov a ak na to použijeme palmový olej z plantáží na miestach niekdajších dažďových pralesov v Indonézii, pre ktoré je typická rašelinová pôda, bude to až neuveriteľných 423 rokov.

Likvidácia prírodných biotopov spojená s priemyslom biopalív dnes patrí k hlavným novým procesom straty biodiverzity. Výskum na plantážach palmy olejovej potvrdil až 73 – 77 %-ný pokles druhovej diverzity vtákov a až 90 %-ný pokles druhovej diverzity cicavcov oproti diverzite tropických pralesov, ktoré tieto plantáže nahradili. Ohrozené druhy týchto pralesov zväčša neboli na týchto plantážach pozorované. Zničenie pralesov postihlo aj bezstavovce, napr. diverzita motýľov sa na plantážach znížila o 79 – 83 %.

Otázkou tiež je, či je vôbec rozumné a etické pestovať na ornej pôde namiesto potravín plodiny pre biopalivá, keď do roku 2050 budeme musieť kvôli nárastu ľudskej populácie a jej spotreby podstatne zvýšiť aj produkciu potravín? V praxi to totiž znamená, že ornú pôdu, ktorú dnes vyčleníme na produkciu biopalív budeme musieť skôr či neskôr nahradiť na úkor iných významných biotopov, vrátane lesov, lúk a mokradí. Pre akúkoľvek produkciu dostupný krajinný priestor je tiež konečným a limitovaným prírodným zdrojom. Navyše, pri zahrnutí všetkých energetických vstupov vyžadovaných mechanizáciou, priemyselnou produkciou hnojív a pesticídov atď., je energetická návratnosť (pomer z procesu získaného množstva energie oproti množstvu energie, ktorá doň bola vložená) často relatívne veľmi nízka.

Upravené podľa: MADDOX et al. 2007; ZAH et al. 2007; FARGIONE et al. 2008; KOH & WILCOVE 2008; SEARCHINGER et al. 2008; DANIELSEN et al. 2009; PLESNÍK 2009; STROMBERG et al. 2010; CBD 2012; FAO 2019a; EPA 2020

Podobne **kontroverzné je pestovanie biopalív na ornej pôde**, predovšetkým plantáže kapusty repkovej pravej (*Brassica napus* subsp. *napus*), známejšej pod menom repka olejka, ktorá je náročná na intenzívnu chemickú ochranu. Biopalivá už v niektorých regiónoch vytláčajú pestovanie obilnín a zeleniny, čo vedie k rastu cien potravín. Vzhľadom k tomu, že každoročná primárna produkcia biomasy v každej krajine je konečná, z pohľadu prvého termodynamického zákona je súčasná „akože zelená" orientácia Európskej únie aj Slovenska na rastúci podiel biopalív v pohonných hmotách veľmi sporná.

Vo fosílnych palivách je totiž naakumulovaná energia, ktorú sa v procesoch fotosyntézy viazala do chemických zlúčenín v pletivách rastlín niekoľko sto miliónov rokov. Významnú časť takto viazanej energie sme spálili v priebehu pár storočí. Biopalivá predstavujú iba ročný prírastok (v prípade lesných porastov o dva rády dlhší) primárnej produkcie ekosystémov Zeme. Ak vezmeme ceruzku a začneme počítať, vyjde nám, že **biopalivá môžu nahradiť iba zlomok fosílnej energie**.

Iba časť OZE má trvalý charakter (kap. 2) a nemá nepriaznivé vplyvy na životné prostredie (to závisí aj od ich lokalizácie). Napr. k problémom módnych malých vodných elektrární patrí ohrozenie migrácie vodných živočíchov, fragmentácia ďalších biotopov budovaním prístupových ciest, zmeny hydrologických podmienok v krajine. K environmentálnym vplyvom solárnych elektrární na lúkach a poliach patria zábery krajiny, neraz aj úrodnej ornej pôdy a používanie herbicídov na potláčanie rastu vegetácie. Pripomínajme si preto, že podľa prvého termodynamického zákona **„nijaká energia nie je zadarmo"**.

4.2.2 Druhý termodynamický zákon a jeho environmentálne implikácie

Pod kvalitou energie sa rozumie jej schopnosť konať prácu. Ako sme už uviedli, maximálna potenciálna schopnosť energie konať prácu sa vždy vzťahuje ku konkrétnemu prostrediu a nazýva sa **exergia**. Kvalitná energia je teda energia so schopnosťou konať v danom prostredí prácu. Vysoko kvalitnou energiou (t. j. s vysokou exergiou) je napr. energia slnečného žiarenia, fosílnych palív, elektrická energia, atď. Odvrátenou stranou schopnosti energie konať prácu je produkcia entropie.

Pojem entropie úzko súvisí s druhým termodynamickým zákonom, ktorý ako prvý sformuloval francúzsky fyzik a matematik Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796 – 1832). Dôsledkom tohto zákona je nevratnosť prírodných procesov (nemôžeme napr. vrátiť späť do nádoby rozliate mlieko, zvrátiť rast organizmu alebo obrátiť smer ekologickej sukcesie). Podľa druhého termodynamického zákona **entropia každého izolovaného systému pri všetkých procesoch rastie**, čo sa prejavuje tým, že usporiadanie systému sa znižuje. Izolovaný systém preto nevyhnutne spontánne smeruje k bodu termodynamickej rovnováhy, v ktorom už nie je k dispozícii taká energia, ktorá je vzhľadom k prostrediu schopná konať prácu a entropia je maximálna, žiadne ďalšie procesy už nie sú možné, systém je „mŕtvy" (JØRGENSEN et al. 2007).

Príčinou rastu entropie je, že **pri každej zmene energie z jednej formy na druhú dochádza k degradácii určitej časti tejto energie na menej kvalitnú,** ktorá má nižšiu schopnosť konať prácu, je menej koncentrovaná, viac rozptýlená a menej užitočná (JØRGENSEN & SVIREZHEV 2004). Energia nevzniká ani nezaniká, ale pri každej jej transformácii sa nevyhnutne znižuje kvalita časti jej množstva. Táto zmena kvality je cenou za využitie schopnosti energie konať prácu, ktorá v živých systémoch znamená zvyšovanie ich štrukturálnej a funkčnej zložitosti a uchovávanie kvalitnej energie v chemických zlúčeninách. Cenou je produkcia a export entropie do okolia systému. Napr. pri transformáciách energie v rámci trofických reťazcov sa degradovaná časť energie exportuje do priestoru sálaním ako dlhovlnné elektromagnetické žiarenie.

Entropia

Opakom zvyšovania organizácie, usporiadanosti systému je entropia, špecifická vlastnosť termodynamického systému. Rast entropie je nevyhnutným výsledkom transformácií energie v systéme, dôsledkom degradácie časti kvalitnej energie. S malým zjednodušením je možné povedať, že **entropia je mierou vnútornej neusporiadanosti a chaotickosti správania sa systému**. Ak sa usporiadanie systému zvyšuje, jeho entropia klesá. Naopak, rast entropie je vyjadrením procesov dezintegrácie systému.

Paradoxne, živé systémy nezvyšujú svoju entropiu, ale naopak, zvyšujú a udržiavajú svoju usporiadanosť, t.j. svoju biologickú a ekologickú integritu. Vysvetlenie je v tom, že organizmy, populácie ani ekosystémy nie sú izolované systémy, ale napriek tomu, že sú organizačne uzavreté, súčasne sú termodynamicky otvorené, t. j. ich existencia je podmienená viac-menej neustálym prísunom kvalitnej energie a exportom entropie, málo kvalitnej energie za hranice systému (napr. sálaním tepla zo slnkom rozpáleného odkrytého substrátu, pôdy alebo z tiel organizmov, vylučovaním exkrementov a pod.).

Kvantifikácia a interpretácia zmien entropie otvoreného termodynamického systému

Zmena entropie otvoreného systému a jeho okolia v čase: **$dS/dt = dS_i/dt + dS_e/dt$,** kde dS_i je zmena vnútornej entropie systému a dS_e je výmena jeho entropie s okolím. Ak je $dS_e/dt > dS_i/dt$, potom systém exportuje viac entropie ako sám vytvára, čo znamená záporný prírastok entropie, rast usporiadanosti.

Entropia ako pravdepodobnosť stavu systému: Boltzmann navrhol pre výpočet entropie nasledovný vzorec: **$S = k \ln \Omega$,** kde Ω je počet možných stavov sytému (vyjadrených zmenami hodnôt makroskopických premenných systému) a k je Boltzmannova konštanta $k = 1{,}38.10^{-23}\ J.K^{-1}$.

Vyjadrenie entropie, ak stavy systému majú rôznu pravdepodobnosť: V tomto prípade môžeme entropiu systému hodnotiť podľa vzorca **$S = - k \sum_{i=1,\Omega} p_i . \ln p_i$,** kde p_i je pravdepodobnosť, s akou nastane udalosť vedúca k stavu „i" systému. Entropia systému tu rastie priamo úmerne počtu jeho rôznych stavov a súčasne v jeho ekvitabilite, rovnomernosti ich zastúpenia v správaní sa systému.

Zdroj: KREMPASKÝ 1982; JØRGENSEN et al. 2007; TELEKI & LACSNÝ 2010

Environmentálne implikácie druhého termodynamického zákona

Ontogenetický aj evolučný vývoj smerom k vyššej biologickej a ekologickej zložitosti, je v zdanlivom rozpore s druhým termodynamickým zákonom, podľa ktorého transformácie energie prítomnej v systéme nutne znižujú jej kvalitu, čím systém zvyšuje svoju entropiu, neusporiadanosť. Tento zákon však v uvedenom znení platí iba pre uzavreté systémy. Každý živý organizmus, spoločenstvo a ekosystém sú otvorené systémy, ktoré prijímajú vysokokvalitnú energiu (pôvodom najmä slnečnú energiu).

Práve **neustály prísun energie im umožňuje zvyšovať svoju organizáciu, usporiadanosť,** aj napriek tomu, že kvalita energie sa pri každej jej transformácii v systéme znižuje (pri metabolických procesoch v organizme, pri evapotranspirácii, pri kondukcii tepla a pod.), čo sprevádza produkcia entropie. Zvyšovaniu entropie sa živé systémy, od najnižšej úrovne až po Zemský ekosystém bránia jej exportom za hranice. Kľúčové sú dva mechanizmy: vyžarovanie odpadového tepla do priestoru vo forme dlhovlnného IR žiarenia a dôsledná recyklácia „odpadov", ktorú zabezpečujú detritové potravné reťazce.

Do biológie a ekológie druhý termodynamický zákon prináša predstavu **nevratných procesov**, *„šíp času"* (autorom pojmu je britský fyzik Arthur Eddington, 1929). Nevratnosť biologických a ekologických procesov vyplýva z faktu, že stratám energie sa pri žiadnej konverzii energie nedá úplne vyhnúť. Tieto transformácie prebiehajú na každej hierarchickej úrovni organizácie prírodných, socioekonomických aj technických systémov. Ich nevyhnutným dôsledkom je produkcia entropie.

Druhý termodynamický zákon nám pomáha pochopiť aj podstatu súčasnej environmentálnej krízy. Obrovská spotreba energie našou civilizáciou má totiž nevyhnutne i odvrátenú tvár, ktorou je podobne obrovská produkcia entropie, napr. vo forme emisií zo spaľovania fosílnych palív (aj biomasy), vo forme znečisťovania pôdy, vody a ovzdušia, vo forme výrubov tropických pralesov, globálneho rozširovania oráčin, sídel a mnohé ďalšie formy. Môžeme konštatovať, že narušenie život udržiavajúcich systémov Zeme a rastúci úbytok hojnosti a rozmanitosti života je dôsledkom veľmi vysokej a stále rastúcej **entropizácie Zemského ekosystému** v dôsledku ľudských aktivít (MUYS 2013).

Prejavom tejto entropizácie je aj likvidácia, fragmentácia, znečisťovanie a iná degradácia až dezintegrácia prírodných (aj poloprírodných) ekosystémov a tým aj znižovanie ich kapacity podporovať existenciu a prosperitu ľudskej civilizácie. Túto entropizáciu nemôže zastaviť púha náhrada jedného typu energie

(fosílnych palív) za iný typ (obnoviteľné zdroje). Ak chceme riešiť nielen symptómy, ale aj hybné sily globálnej environmentálnej krízy, **primárne musíme riešiť spotrebu energie** a nie iba formy jej získavania.

Ako ušetriť energiu, zvyšovanie účinnosti jej konverzie

Odkaz prvého a druhého termodynamického zákona je jasný: súčasný objem spotrebúvanej energie fosílnych palív nemáme šancu plne nahradiť obnoviteľnými zdrojmi energie. Tie sú iste dôležité, ale primárne je znížiť súčasnú enormnú globálnu spotrebu energie. Jednou z ciest je **zvyšovanie účinnosti konverzie energie** (pri jej „produkcii" a pri jej využívaní v elektrospotrebičoch). Napr. v klasických žiarovkách sa iba cca 5 – 10 % elektrickej energie mení na svetlo a zvyšok sa mení na teplo, kým v žiarivkách je to viac ako 20 % a LED žiarovky dokonca na dosiahnutie rovnakého svetelného roku spotrebúvajú až rádovo menej energie ako klasické žiarovky. Účinnosť využitia energie v zážihovom spaľovacom motore je 20 – 30 %, kým vo vznetovom dieselovom motore je to 30 – 40 %. Tu opäť dochádza k paradoxu: keďže dieselové motory emitujú viac znečisťujúcich látok (najmä pre ľudské zdravie vysoko škodlivých PM častíc), posledné roky rastú tlaky na útlm ich využívania v automobilovej doprave, čo však vzhľadom k nižšej účinnosti benzínom poháňaných motorov znamená vyššiu spotrebu energie.

Môžeme zhrnúť, že jednou z ciest zníženia spotreby energie je zvyšovanie účinnosti jej konverzie prostredníctvom vývoja nových technológií, avšak treba pamätať, že aj táto cesta má svoje hranice. Napr. podľa MILLERA (2005) je v USA priestor na celkové zvýšenie účinnosti využitia energie vo výške cca 43 %, ale stratám ďalších 41 % sa v dôsledku platnosti druhého termodynamického zákona nebude dať vyhnúť. Ďalšie poučenie zo zákonov termodynamiky je v tom, že **vysoko kvalitnú energiu by sme nemali využívať na produkciu menej kvalitnej energie** (napr. používať elektrickú energiu na vykurovanie budov). A keďže pri žiadnej konverzii energie sa nevyhneme produkcii entropie vo forme odpadového tepla, energiu ušetríme aj jeho využívaním, napr. na vykurovanie obytných alebo priemyselných zón.

Energiu ušetríme aj zmenou stravovacích návykov

Druhý termodynamický zákon umožňuje vysvetliť aj dôležité charakteristiky potravných reťazcov. Patrí k nim najmä **obmedzenie ich maximálnej dĺžky**, čo súvisí s nízkou ekologickou účinnosťou konverzie energie na jednotlivých trofických úrovniach (iba 5 – 20 %). To znamená, že smerom k vyšším trofickým úrovniam veľkosť dostupnej energie rýchlo klesá, vzniká **pyramída biomasy** (ELIÁŠ 2007).

To nám ponúka možnosť ušetriť ďalšiu energiu zmenou životného štýlu. Pre ilustráciu uvažujme s hypotetickou priemernou ekologickou účinnosťou konverzie energie na každej trofickej úrovni 10 %. Potom energia dostupná na každej ďalšej vyššej úrovni bude oproti predošlej cca 10-krát menšia, pri prechode dvomi úrovňami 100-krát a pri prechode tromi až 1 000-krát menšia. Bohatá mäsová diéta bežná vo vyspelých štátoch je teda mimoriadne náročná na potravné zdroje. Na výrobu 1 kg mäsa je potrebných 10 až 20 kg obilnín a preto sa dnes polovica ornej pôdy na svete využíva na produkciu kŕmneho obilia. Ak je v súčasnosti na ornú pôdu premenených 12 % rozlohy kontinentov a ekologické štúdie hovoria o 15 % ako o ekologickej hranici (ROCKSTRÖM et al. 2009) je zrejmé, že s tým musíme niečo urobiť.

Neznamená to, že všetci musíme byť vegetariánmi, svoju ekologickú stopu znížime už tým, ak znížime spotrebu mäsa. Druhou stranou mince totiž je, že ak by sme sa všetci stali vegetariánmi alebo vegánmi, skôr či neskôr by zanikol aj chov hovädzieho dobytka – a s ním aj krásne druhovo pestré lúky a pasienky pod hornou hranicou lesa. Navyše by sme stratili aj významný zdroj organického hnojiva, čo by viedlo k ešte vyššiemu prísunu priemyselne vyrábaných minerálnych hnojív na polia.

Hmyz ako potrava človeka

Inou alternatívou ako znížiť energetickú náročnosť našej potravy je konzumácia hmyzu (obr. 4.8). Hmyz sa prevažne nachádza na nižších trofických úrovniach, kde je k dispozícii niekoľkonásobne viac biomasy (a tým aj energie) ako na vyššej trofickej úrovni, preto produkcia potravín z hmyzu je oveľa

menej energeticky náročná ako produkcia mäsa chovom teplokrvných stavovcov (najmä veľkých cicavcov a hydiny). Pre Európana nezvyčajná predstava, avšak v mnohých častiach sveta **hmyz oddávna patril k významným potravným zdrojom**. K najvýznamnejším aj dnes patria kobylky, cikády, húsenice, larvy chrobákov aj dospelé jedince, termity, včely, osy a ich larvy a rozmanitý vodný hmyz. V južnej Afrike je potrava z hmyzu (najmä veľké húsenice druhu *Gonimbrasia belina)* dokonca súčasťou tamojšieho medzinárodného obchodu (DEFOLIART 1992, 1999).

Obr. 4.8. Smažené svrčky a cikády na trhu v Tepoztláne, Mexiko. Podľa FAO na rovnaký objem produkcie proteínov spotrebujú 6-krát menej potravy ako hovädzí dobytok, 4-krát menej ako ovce a 2-krát menej ako hydina. *Foto:* Meutia Chaerani /Indradi Soemardjan http://www.indrani.net/, 2006. Creative Commons BY 2.5, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chapulines.jpg

Z hľadiska ľudskej výživy má hmyz významnú **kalorickú hodnotu** (vyššiu akú ju má napr. sója). Tiež má významný obsah **proteínov, vitamínov, minerálov a vlákniny**, pre obyvateľov dištriktu Kwango v Demokratickej republike Kongo je hmyz hlavným zdrojom až 37 % živočíšnych bielkovín.

Podobne rozbor tkaniva húsenice motýľa *Usta terpsichore,* ktorá je obľúbenou potravou v Angole, potvrdil vysoký obsah železa, zinku a medi, vitamínov B_1 a B_2, pričom už 100 g tohto hmyzu pokrýva dennú potrebu týchto minerálov a vitamínov (DEFOLIART 1992). Keďže viaceré jedlé druhy hmyzu sú zároveň významnými škodcami poľnohospodárskych plodín, ich zber a konzumácia môže súčasne prispieť k potláčaniu populácií týchto škodcov biologickými metódami.

4.3 Informácia ako významný prírodný aj kultúrny zdroj

Informácia (z latinského „*in-formatio*“ – utváranie, stvárnenie) sa používa v mnohorakých významoch. V základnom vyjadrení informácia **označuje údaje** o prvkoch, systémoch a ich prostrediach, v širšom zmysle aj ich komunikáciu a šírenie (informovanie). Informáciou môže byť napr. obsah správy v médiách, popis vlastností určitého prvku alebo systému alebo jeho štruktúry a funkcií, uverejnený v časopise, výpis údajov z počítačovej databázy, sekvencia genómu určitého ďruhu, fotografie, mapy a iné.

Informácia sa v systéme uchováva prostredníctvom určitého usporiadania fyzickej štruktúry, napr. inštrukcií strojového kódu v počítači, usporiadania genetického kódu DNA v živom organizme, zatriedenia kníh v knižnici. Informácia sa niekedy zamieňa so signálom alebo znakom, ale tieto predstavujú iba jej **kódovanú reprezentáciu** v konkrétnom systéme (napr. vo forme bitovej reprezentácie v počítači, znakovej reprezentácie v ľudskom jazyku alebo postupnosti nukleotidov v géne, ktorá kóduje jeho funkciu). Táto reprezentácia je užitočná, pretože umožňuje pracovať s informáciou podľa určitých pravidiel (napr. pravidlá usporadúvania znakov a slov definujú možnosti skladby vety).

Na rozdiel od hmoty a energie informácia získava svoj zmysel až v spojení s inou informáciou, t.j. je **vždy kontextuálna** (CAPRA 1997). Užitočnosť a využiteľnosť informácie pozorovateľom závisí od kontextu jeho vlastného poznania, vrátane jeho autentickej skúsenosti. **Mierou informácie je neurčitosť** – pravdepodobnosť správania sa systému je totiž nepriamo úmerná informácii, ktorú obsahuje. To znamená, čím je táto informácia väčšia, tým ťažšie je predvídať jeho správanie a preto pravdepodobnosť, že nastane určitá udalosť je tu nižšia ako pri informačne jednoduchšom systéme.

Podľa O´CONNOR et al. (2019) „***informácia je fundamentálnou črtou živých systémov a preto aj ekologických systémov****... prostredníctvom spätných väzieb interaguje s energetickými procesmi a s materiálovými cyklami ovplyvňujúc štruktúru, funkcie a organizáciu ekologických systémov*“. Všetky existujúce biologické a ekologické, ale aj sociálno-ekonomické resp. sociálno-ekologické systémy sa udržiavajú a reprodukujú prostredníctvom tokov a transformácií triády hmoty, energie a informácie.

Informácia je inherentnou súčasťou každého živého systému, ovplyvňuje jeho fyzickú štruktúru aj jeho správanie. Všetky biologické, ekologické systémy a sociálno-ekonomické sa vyvíjajú, udržiavajú a reprodukujú prostredníctvom tokov a transformácií hmoty, energie a informácie, vrátane sociálno-ekologických systémov, ktoré sú syntézou ekosystémov a socioekonomických systémov (obr. 4.9). **Informáciu preto považujeme za významný nehmotný prírodný zdroj,** ktorý prepája nielen entity na rovnakej úrovni hierarchie (napr. bunky v tkanive, populácie v ekosystéme), ale aj samotné hierarchie (napr. tkanivá s orgánmi, ktoré vytvárajú, ekosystémy s hierarchicky vyššími ekosystémami).

4.3.1 Genetická informácia

Okrem hmotných, energetických a priestorových zdrojov je podmienkou existencie života aj **genetická informácia, ktorá sa v biosfére naakumulovala v priebehu biologickej evolúcie**. Táto sa uchováva v chromozómoch organizmov, ktoré pozostávajú z DNA a príslušných bielkovín. Ako sme už spomenuli (v kap. 3), DNA je deoxyribonukleová kyselina tvorená polymérmi malých organických molekúl, nukleotidov. V nukleotidoch sa nukleové bázy viažu do dvojíc (G – C, A –T a A – U), čím vytvárajú kód pre zápis genetickej informácie. Dva prepojené reťazce nukleotidov v DNA vytvárajú dvojitú špirálu.

Dôležité je nielen kódovanie informácie, ale najmä jej sémantický význam – priraďovanie konkrétnych postupov výstavby proteínov (a iných látok) a ich funkcií špecifickým kombináciám nukleotidov (KÜPPERS 2000). Úseky DNA zodpovedajúce jednotkám genetickej informácie sa nazývajú **gény** a súbor všetkých génov v chromozómoch každej bunky organizmu tvorí **genotyp**, súbor všetkých génov populácie je jej **genofond,** kým kompletná genetická informácia druhu predstavuje jeho **genóm.** Napr. ľudské telo obsahuje až 30 triliónov buniek, ktoré všetky obsahujú rovnakú genetickú informáciu.

Informáciu v DNA si môžeme predstaviť ako encyklopédiu, ktorá obsahuje všetky inštrukcie ako vytvoriť nového jedinca (STARR et al. 2013), kým interpretačné mechanizmy sú „vývojárom“, ktorý podľa nej postupuje a vytvára pre organizmus (v danej fáze jeho vývoja a v danom prostredí) potrebné bielkoviny. Prvým krokom tohto procesu je vytvorenie RNA (ribonukleová kyselina) do ktorej sa prepisuje informácia z DNA. Na rozdiel od DNA je RNA spravidla tvorená iba jedným vláknom nukleotidov. Kým úlohou DNA je uchovávať v bunke dedičnú informáciu, RNA už vstupuje do procesu syntézy bielkovín a riadi ho.

V roku 2013 bol v časopise Science publikovaný významný **objav druhého kódu skrytého v DNA**, ktorý pomáha riadiť vyjadrenia jednotlivých génov. Umožňuje napr. stabilizovať tvorbu a vlastnosti proteínov (STERGACHIS et al. 2013). Tento nový objav rozširuje aj obraz DNA ako výkonného a precízneho informačného zariadenia. Znamená to, že zmeny DNA môžu viesť nielen k narušeniu klasického genetického kódovania, ale aj k narušeniu riadenia génov, čo rozširuje spektrum možných príčin ochorení.

Kontextuálnosť informácie v prípade genómu druhu znamená, že tento *„nie je iba knihou o organizme, ale aj knihou o jeho životnom prostredí, vrátane druhov, s ktorými sa koevolučne vyvíjal*“ (ADAMI et al. 2000). To vedie k jednému z možných vysvetlení, prečo **genóm mnohých druhov rastlín je veľmi rozsiahly** (napr. rod lucerna má až 40 000 génov), dokonca často väčší ako genóm evolučne oveľa vyspelejších foriem, napríklad primátov. Rastliny ako prisadlé organizmy totiž nemajú možnosť reagovať na zmeny ich prostredia a na tlak konkurenčných druhov, herbivorov a patogénov premiestnením sa na inú lokalitu a preto museli vyvinúť veľmi rozmanité a početné stratégie svojho prežitia, vrátane stratégií ich reprodukcie (STERCK et al. 2007). Je teda zrejmé, že neplatí priama úmera medzi počtom génov a evolučnou vyspelosťou (resp. tiež zložitosťou) taxónu.

Inteligencia rastlín

Správanie organizmov súvisí so získavaním informácií o ich okolí a ich spracovaní. Ak inteligenciu navyše chápeme aj ako „*schopnosť riešenia problémov*“ a „*profitovanie zo skúsenosti*“, potom toto kritérium do istej miery spĺňajú aj rastliny. Niektorí vedci za ich „*nervové centrum*“ považujú koreňovú špičku, ktorá vníma a vyhodnocuje signály týkajúce sa napr. gravitácie, voľného priestoru, výskytu živín a vody.

Zelené rastliny však dokážu optimalizovať nielen smer rastu koreňa v pôde, ale aj zachytávanie slnečnej energie listami, rýchlosť fotosyntézy a účinne regulovať aj teplotu ich orgánov. Prostredníctvom otvárania a zatvárania prieduchov regulujú aj transpiráciu, výpar vody zo stoniek a listov. Podľa iných vedcov je preto „*nervový systém*“ rastlín (ak nejaký existuje) silne decentralizovaný, a to až na úroveň buniek.

Zdá sa, že jazykom, ktorý rastliny využívajú na vzájomné „dorozumievanie sa“, sú prchavé organické látky (VOC – *Volatile Organic Compounds*), ktoré môžu byť emitované koreňmi, výhonkami, kôrou, listami, kvetmi aj plodmi. Jednotlivé druhy emitujú svoje vlastné spektrum VOC. Početné štúdie sa zameriavajú najmä na rolu VOC v mutualistických interakciách, ako sú opeľovanie a rozširovanie rastlín, ale posledné desaťročia rastie počet štúdií, ktoré skúmajú rolu VOC aj v prípade záporných interakcií.

Takýmto spôsobom sa rastliny vzájomne informujú napr. o útoku herbivorov alebo patogénov – ako to bolo preukázané v prípade akácií (*Acacia* sp.) rastúcich v africkej savane a riedkolesoch. K ich typickým bylinožravcom patrí aj kudu veľký (*Tragelaphus strepsiceros*), jedna z najväčších antilop, pre ktorú sú listy akácie dôležitou potravou. Výskumom, ktorý začal už v 90. rokoch minulého storočia sa zistilo, že akácie sa v obdobiach intenzívneho sucha (kedy je pre antilopy k dispozícii málo trávy a orientujú sa njamä na listy akácií) bránia pred zvýšeným tlakom antilop kudu posielaním varovných VOC signálov svojím susedom, ktorí následne zvyšujú produkciu pre antilopy zdravotne nepriaznivého tanínu na štvornásobok. Výsledkom je narušenie procesov fermentácie potravy u týchto antilop a ich masový úhyn.

Navyše sa zdá, že rastliny sa dokážu poučiť aj zo skúsenosti (čo vedie k hypotéze o „pamäti rastlín“), pretože keď sa podobné útoky herbivorov zopakujú, dokážu sa už rýchlejšie brániť. Podobne aj borovice v prevažne ihličnatých lesoch Skalistých hôr prostredníctvom VOC signálov varujú iné jedince svojho druhu pred útokom lykožrúta (ako potvdil výskum v prípade borovice stočenej – *Pinus contorta*).

Ďalším nástrojom komunikácie rastlín sú mykorízne siete, bežné vo väčšine prírodných ekosystémov, avšak najmohutnejšie práve v lesoch, vytvárajúce akýsi „lesný internet“. Výskum americkej lesníčky a ekologičky Suzanne Simard v ihličnatých lesoch Britskej Kolumbie preukázal, že rastliny (v danom prípade jedince druhu duglaska tisolistá, *Pseudotsuga menziesii*) si cez túto sieť neposielajú iba chemické signály, vodu a živiny (najmä dusík a fosfor), ale aj asimiláty a dokonca aj obranné látky proti herbivorom. Tento transport sa deje smerom od tzv. materských stromov k mladým semenáčikom a k mladým jedincom, ktorých rast tienia dospelé stromy a ktorým týmto spôsobom materské stromy pomáhajú.

Pozoruhodné je, že transfer asimilátov môže existovať dokonca aj medzi jedincami rôznych druhov. Výskum v Skalistých horách ho potvrdil konkrétne medzi duglaskou a brezou papierovou (*Betula papyrifera*), obr. 4.9. V lete posielala viac uhlíka breza duglaske a na jeseň, keď breza už nemá lístie, ale duglaska ešte stále fotosyntetizuje, sa tok asimilátov obrátil. Ide o významné zistenie, že medzi stromami v lese neexistujú iba konkurenčné vzťahy (tradičný zápas o priestor, živiny v pôde, vodu a slnečný svit), ale že jednotlivé stromy, a to nielen rovnakého druhu, spolu spolupracujú a vzájomne si pomáhajú.

Najintenzívnejšia komunikácia a transport látok existuje v rámci miestnej populácie rovnakého druhu. Za povšimnutie stojí, že uvedený transport je minimálny v prípade rovnovekých lesov, ktoré sa vysadili po holoruboch. Pri tomto spôsobe ťažby a výsadby sa totiž poškodzuje mykorízna sieť a prirodzené vzťahy medzi stromami rôzneho veku ani nemôžu vzniknúť, keďže aj materské stromy sa vyrubujú.

Zdá sa, že lesné ekosystémy sú oveľa zložitejšie ako si vedci aj verejnosť ešte donedávna mysleli a ich dynamika nesúvisí iba s abiotickými a biotickými faktormi, aj disturbanciami, ale tiež s inteligenciou rastlín. Aj preto by sa lesné hospodárenie malo transformovať smerom k prírode blízkemu obhospodarovaniu lesa. To znamená najmä uprednostňovať výberkovú ťažbu, pri ktorej ostávajú v lese materské stromy posielajúce „rady, varovania a záchranné balíky“, ktoré pomáhajú prežiť mladým stromom.

Upravené podľa: YAM 1990; SIMARD et al. 2012; TREWAVAS 2014, 2016; HUSSAIN et al. 2019

Obr. 4.9. a) Najvyššia duglaska tisolistá v Oregone, obvod kmeňa cez 12 m a vek 600 – 800 rokov, b) breza papierová v Národnom parku Acadia. Výskum Susan Simard v Skalistých horách preukázal, že oba druhy si vzájomne vypomáhajú posielaním asimilátov cez mykoríznu sieť.
Foto a: Oregon Caves, from Cave Junction, USA, Flickr, 2007. *Zdroj:* Big Tree, Flickr, Creative Commons BY 2.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pseudotsuga_menziesii_big_tree_Oregon_Caves_NM.jpg; *Foto b:* InAweofGod'sCreation, Flickr, 2009. *Zdroj:* 13. The Fall of Acadia, Flickr, Creative Commons BY 2.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:13._The_Fall_of_Acadia_(4039110079).jpg

Aj gény majú svojich interpretov

Podľa informácie kódovanej v základných jednotkách dedičnosti, v **génoch**, sa syntetizujú látky (proteíny), ktoré regulujú výstavbu fyzickej štruktúry, špecializáciu a funkcie buniek v tkanivách a pletivách, ako aj správanie sa buniek organizmu. Pripomeňme si, že podľa paradigmy **genetického determinizmu** (DAWKINS 1996) gény absolútne definujú štruktúru a správanie každého organizmu: v genóme je zakódovaný nielen program striktne predurčeného ontogenetického vývoja organizmu, riadiaci aj diferenciáciu jeho buniek, ale aj presný program jeho správania (vrátane ľudského organizmu). Avšak ako sme však už uviedli v kapitole 1, takýto pohľad je príliš zjednodušený.

Fenotypové vyjadrenie organizmu totiž závisí nielen od genetickej informácie zapísanej v DNA, ale aj od **epigenetických mechanizmov**, ktoré regulujú aktivitu a expresiu (prejav) jednotlivých génov vo fenotype aj v závislosti od podmienok prostredia organizmov a od pozície organizmu na jeho životnej trajektórii. Súčasťou týchto biochemických mechanizmov sú zložité komunikačné siete vnútri chromozómov aj medzi nimi (FRASER & BICKMORE 2007), a spätnoväzobné okruhy reflektujúce vplyvy prostredia.

Vedný odbor, ktorý sa zaoberá expresiou génov vo fenotype, vrátane takých dedičných zmien fenotypu, ktoré nie sú vyvolané genetickými zmenami, sa nazýva **epigenetika**. Biochemickými zmenami podmienené znaky sa totiž môžu prenášať na potomkov aj bez zmeny samotnej DNA. Keď sa faktory prostredia, ktoré viedli k vzniku nových znakov, vrátia do normálu, pôvodné vyjadrenia génov sa obnovia a nové znaky sa vo fenotype stratia. U človeka sú tieto zmeny podmienené nielen fyzickými a chemickými, ale tiež sociálnymi a emocionálnymi faktormi jeho životného a pracovného prostredia.

Zo syntetických chemikálií v životnom prostredí patria pre cicavce k vysoko nebezpečným predovšetkým **endokrinné disruptory,** chemické látky, ktoré môžu narúšať endokrinný systém organizmov a tým vyvolávať najrôznejšie ochorenia. Je zrejmé, že súčasné rozsiahle zmeny životného prostredia a jeho vysoká chemizácia môžu vplývať aj na jemné epigenetické mechanizmy, čo môže mať ďalekosiahle dôsledky týkajúce sa onkologických ochorení, reprodukčných defektov a dokonca aj obezity, pričom tieto zmeny vyjadrenia fenotypu môžu byť dedičné (GUERRERO-BOSAGNA & SKINNER 2010).

4.3.2 Kultúrna informácia

Súčasťou biologickej evolúcie je aj vznik ľudského vedomia ako *„fenomenologického výsledku komplexifikácie mozgu“* (KOVÁČ 2003). Tendencia života k zvyšovaniu zložitosti sa premieta aj do kultúrnej evolúcie človeka a spoločnosti. Početné **definície ľudskej kultúry** zväčša zdôrazňujú, že táto zahŕňa spektrum všetkého ľudského správania a súhrn všetkých materiálnych aj nehmotných ľudských výtvorov. Vysoká rozmanitosť tradičných kultúr odráža rozmanitosť ich prostredí, preto môžu byť cenným zdrojom inšpirácií ako riešiť aj dnešné problémy (MCNEELY 1992). Základom je kombinácia skúseností a intelektu v procese myslenia ako získavania, uchovávania, spracúvania a interpretácie informácií.

CAPRA (1997) **proces poznávania** dokonca **stotožňuje s procesom života**, pričom sa odvoláva na duchovné tradície ľudstva, poukazuje napr. na spoločný etymologický základ slov duša, duch a dych v sanskrite, v gréčtine, latinčine aj v hebrejčine. Pre Starú Indiu, antické Grécko aj Rím, a do značnej miery aj pre židovský Jeruzalem boli duša a duch obrazom *„dychu života“*. Capra tento spoločný základ prerozprával v jazyku kybernetiky ako schopnosť živého organizmu nadobúdať určité poznanie.

Samozrejme, *„mentálne úrovne“* výrazne odlišných foriem života (napr. človeka a améby) sú aj podľa neho veľmi vzdialené. Navyše ľudské myslenie sa vyznačuje **schopnosťou abstrakcie, používania symbolov** (jazyka) a generovania ideí. Preto ani Capra nekladie na jednu rovinu človeka a amébu, tvrdí iba, že ľudské myslenie sa evolučne vyvinulo z procesov poznávania, ktorých zárodky možno nájsť aj u primitívnych organizmov. S Caprom nemusíme súhlasiť, ale jeho dôraz na **procesné a kontextuálne aspekty poznania** a jeho poukázanie na oveľa väčšie rozšírenie inteligencie v prírode, ako si pripúšťame, je cenný.

V dnešnej dobe je už počítač nepostrádateľným nástrojom na zaznamenávanie, uchovávanie, spracovanie a šírenie informácií. Až natoľko, že sa mu stále viac prispôsobujeme a **poznanie si zamieňame** za záplavy správ na webe, údaje v databázach a atraktívne grafické ilustrácie. Avšak nie všetky ľahko dostupné informácie sú pravdivé a objektívne, naopak, mnohé sú zavádzajúce až falošné (*fake news*), prípadne podvodné poplašné, nebezpečné alebo v lepšom prípade zbytočné reťazové správy (*hoax*). Navyše všetky informácie, teda aj tie z internetu, nadobúdajú pre nás reálnu hodnotu až vtedy, ak ich dokážeme zakomponovať do kontextu vlastných skúseností, vlastného myslenia a poznania, vlastných ideí.

Navyše ľudský mozog funguje inak ako počítač. Výmena programu v počítači neznamená zmenu jeho fyzickej štruktúry, avšak vnímanie nášho okolia zmyslami a uvažovanie v abstraktných symboloch znamená, že prostredníctvom zmien synapsií, prepojení medzi neurónami, sa náš mozog neustále *„premodelováva“* (CAPRA 1997). To znamená, že by sme mali prehodnotiť našu súčasnú vysokú naviazanosť na IT technológie. Problém masového využívania počítačov a robotov nie je iba v tom, že svet každoročne pripravujú o viac ako milión pracovných miest, že vyrábame autonómne zbraňové systémy a že umelá inteligencia by čoskoro mohla prekonať človeka. Riziko je najmä v tom, že ak z nášho sveta odstránime všetko, čo neprispieva k efektívnosti výkonu človeka, aj z nás samotných sa napokon stanú iba roboty.

Iste, bolo by nerozumné nevyužiť obrovský potencál počítačov pre uľahčenie ľudského života. Súčasne však potrebujeme **rozvíjať aj výsostne ľudské poznanie** a kultúru, ktorá nás robí ľudskými bytosťami. Ako stroje nemáme šancu zachrániť divočinu ani seba, ako mysliace a zodpovedné bytosti áno. Podstatnejší ako rozsah informácie je vždy jej obsah. Kým na jednom póle k nám prehovárajú Michelangelove sochy a obrazy, Goetheho Faust alebo Beethovenova 9. symfónia, na opačnom póle sú to ohlušujúce mechanické rytmy našej doby, ktoré prenikli nielen do moderného umenia.

Globálna kríza je totiž aj krízou nášho vnímania sveta okolo nás, ktorého deformácia môže súvisieť s prudkým nástupom virtuálnej reality a informačno-komunikačných technológií v posledných desaťročiach. Tieto technológie nás odbremeňujú od množstva práce, na druhej sú obrovskými „konzumentami“ nášho času a okrádajú nás o reálne zážitky s ľuďmi, aj o zážitky v prírode a krajine, kde žijeme. Zakladateľ ekopsychológie Theodore ROSZAK (1993), ktorý na psychologickej úrovni skúmal obnovu pozitívneho vzťahu človeka s prírodou, vníma degradáciu ekosystémov ako obraz stavu ľudského vnútra: *„Keď v nás pustne duch, bude pustnúť i celý svet, ktorý sme si vybudovali. A to doslova.“* (ROSZAK 2005).

Zhrnutie kapitoly 4

Energia, insolácia Zeme a zonálnosť vegetácie

1) Základom každého pohybu, transformácií a usporiadania hmoty v ľubovoľnom systéme je energia, schopnosť konať prácu. **Exergia označuje kvalitu energie**, mieru tejto schopnosti vo vzťahu k referenčnému prostrediu. Vysokú exergiu má napr. slnečná energia, chemická energia biomasy a fosílnych palív, elektrická energia, ale aj energia ľudskej práce. Kým energia sa pri transformáciách iba mení z jednej formy na druhú, exergia sa vždy znižuje a úmerne tomuto zníženiu rastie entrópia.
2) **Energetický systém Zeme** a život na Zemi v podstatnej miere závisí od kontinuálneho toku slnečnej energie, ktorého intenzita sa periodicky mení v závislosti od postavenia Zeme voči Slnku a zmien slnečnej aktivity. Zemský povrch absorbuje v priemere približne 49 % slnečného žiarenia smerujúceho k Zemi. Slnečná energia je nenahraditeľným palivom pre bezpočetné procesy prebiehajúce v atmosfére, v oceánoch aj na pevnine, zelené rastliny a riasy ju zachytávajú v procese fotosyntézy.
3) **Prirodzený skleníkový efekt** udržiava teplotu zemského povrchu o 33 °C vyššiu ako by bola bez neho, je kľúčovým život udržiavajúcim mechanizmom. Globálne otepľovanie je dnes spôsobené najmä antropogénnym zosilnením tohto efektu. Miera toku slnečnej energie, oslnenie zemského povrchu sa nazýva **insolácia.** Rozdielne oslnenie rôznych šírkových pásiem podmieňuje globálnu atmosférickú cirkuláciu a morské prúdy, ktoré spolu prenášajú veľkú časť tepla od rovníka smerom k pólom.
4) Rozdielna veľkosť oslnenia na rôznych miestach zemského povrchu a jeho zmeny počas dňa a roka podmieňujú rozloženie odlišných **šírkových pásiem Zeme** a v kombinácii s topografiou kontinentov a aj rozmiestnenie veľkých vegetačných pásiem a biogeografických oblastí. Kým v oblasti rovníka a trópov je oslnenie vysoko prebytkové, vo vyšších zemepisných šírkach je deficitné. Život si preto vyžaduje veľký transport energie smerom od rovníka k pólom.
5) V podmienkach terestrických ekosystémov je kľúčové pôsobenie klímy a pôd, preto sa vegetácia mení v závislosti od zemepisnej šírky aj nadmorskej výšky. **Biómy** sú mimoriadne rozsiahle biogeografické zóny s podobnými klimatickými podmienkami, ktoré charakterizuje dominantný typ prirodzenej vegetácie a typické adaptácie druhov k prostrediu. Iné biogeografické členenia rozlišujú ekoregióny alebo biogeografické provincie, podprovincie a okresy. Slovensko leží na styku dvoch panónskej biogeografickej provincie a provincie stredoeurópskych listnatých lesov.
6) Analógiou šírkovej zonálnosti je **výšková stupňovitosť vegetácie**, ktorá vyjadruje zmenu druhového zloženia prírodných fytocenóz v závislosti od zmien makro- a mezoklímy vo vertikálnom smere. Na Slovensku sa rozlišujú tieto vegetačné stupne: nížinný, pahorkatinný, podhorský, nižší a vyšší horský, kosodrevinový (subalpínsky), hôľny (alpínsky) a podsnežný.

Termodynamické zákony a ich implikácie

7) Termodynamika je odbor fyziky, ktorý skúma otázky šírenia tepla, tokov energie a jej transformácií. **Termodynamické princípy** sa v súčasnosti okrem techniky stále viac aplikujú aj v biológii, ekológii, v sociálnych a ekonomických vedách. Štyri termodnymaické zákony definujú základné fyzikálne charakteristiky správania sa systémov, z nich pre živé systémy je kľúčový prvý a druhý zákon.
8) Podľa **prvého termodynamického zákona**, nazývaného aj zákon zachovania energie, táto nemôže vznikať ani zanikať, môže sa iba meniť z jednej formy na inú. Veľkosť tejto zmeny je určená tokom tepla a vykonanej práce. Žiaden pohyb nie je možný bez energie a keďže pohyb prebieha iba v priestore a v čase, vďaka nemu vnímame aj plynutie času. Závažným dôsledkom pre živé systémy je podmienka, že aby biologický alebo ekologický systém mohol existovať, vyvíjať sa a reprodukovať, musí byť **termodynamicky otvorený** k viac - menej kontinuálnemu prísunu energie.
9) Zákon zachovania energie **limituje aj využívanie biologických zdrojov.** Primárna a sekundárna produkcia ekosystému určuje napr. limity spásania fytomasy dobytkom, lovu zvierat, rybolovu, aj využívania biopalív. Podľa tohto zákona napr. biopalivá nikdy nemôžu v plnom rozsahu nahradiť energiu, ktorá sa po stovky miliónov rokov akumulovala vo fosílnych palivách. Dnes sa nezmyselne likvidujú tropické

pralesy často aj za účelom pestovania palmy olejovej, využívanej o.i. aj na produkciu biodieselu.

10) Podľa **druhého termodynamického zákona** entropia každého uzavretého (izolovaného) systému pri všetkých v ňom prebiehajúcich procesoch rastie, to znamená, že jeho vnútorné usporiadanie sa znižuje. Príčinou rastu entropie je, že pri každej zmene energie z jednej formy na druhú dochádza k degradácii určitej časti tejto energie na menej kvalitnú, ktorá má nižšiu schopnosť konať prácu (nižšiu exergiu), je menej koncentrovaná a viac rozptýlená (disipovaná). Uzavretý systém preto spontánne smeruje k bodu termodynamickej rovnováhy, v ktorom je entropia maximálna.
11) Podľa tohto zákona sa súčasná spotreba energie dá znížiť zvyšovaním účinnosti jej konverzie v elektrospotrebičoch, automobiloch, atď., čo však má svoje hranice. **Energiu môžeme ušetriť aj zmenou životného štýlu**, napr. znížením podielu mäsa a zvýšením podielu rastlinnej potravy (t.j. potravy z nižšej trofickej úrovne). Ďalšou možnosťou je konzumácia hmyzu, ktorý sa prevažne nachádza na nižších trofických úrovniach, kde je k dispozícii násobne viac biomasy (a tým aj energie).
12) Často opomínaným resp. **podceňovaným prírodným zdrojom je informácia**, predovšetkým rozsiahla genetická informácia, ktorá sa v organizmoch a tým aj ekosystémoch biosféry akumulovala v priebehu biologickej evolúcie. Treba mať na pamäti, že informácia je vždy kontextuálna, zmysel získava až v spojení s inou informáciou. Napr. genetická informácia v spojení so stavom prostredia a s polohou organizmu na jeho životnej dráhe aktivuje epigenetické interpretačné mechanizmy.
13) Fenotypové vyjadrenie organizmu závisí nielen od tejto genetickej informácie, ale aj od **epigenetických biochemických mechanizmov** interpretácie génov, ktoré s využitím zložitých spätnoväzobných okruhov reflektujú stav a vplyvy prostredia bunky. Tieto jemné mechanizmy môžu byť narúšané masovým používaním rozmanitých syntetických chemikálií.
14) Capra **proces poznávania stotožňuje s procesom života**, pričom sa odvoláva na duchovné tradície ľudstva, poukazujúc napr. na spoločný etymologický základ slov duša, duch a dych, konkrétne v sanskrite, v gréčtine, latinčine aj v hebrejčine. Pre Starú Indiu, antické Grécko aj Rím, a do značnej miery aj pre židovský Jeruzalem boli duša a duch obrazom „*dychu života*“. Capra tento spoločný základ prerozprával v jazyku modernej vedy ako schopnosť každého živého organizmu nadobúdať určité poznanie. Proces života je podľa neho súčasne procesom poznávania.

Otázky

1) Vysvetlite hierarchiu stavebných kameňov hmoty od elementárnych častíc k atómom.
2) Aké významné skupiny organických zlúčenín poznáte? Čo sú to gény?
3) Čím sa odlišujú konvenčný a systémový pohľad na prírodné zdroje?
4) Vysvetlite pojmy energia a exergia. Aký druh energie je nevyhnutný pre života na Zemi?
5) Vysvetlite skleníkový efekt. Aké faktory sa môžu podielať na globálnej zmene klímy?
6) Ako súvisí insolácia zemkého povrchu so zonálnosťou vegetácie podľa zemepisnej šírky?
7) O čom hovorí prvý termodynamický zákon a aké jeho environmentálne implikácie poznáte?
8) O čom hovorí druhý termodynamický zákon a aké jeho environmentálne implikácie poznáte?
9) Prečo by konzumácia hmyzu namiesto bravčového mala prispieť k ochrane biodiverzity?
10) Prečo informáciu považujeme za ďalší dôležitý prírodný (resp. aj kultúrny) zdroj?

Kritické zamyslenie

1) Vedeli by ste charakterizovať vegetáciu výškových vegetačných stupňov Slovenska?
2) V čom vidíte prínosy a v čom riziká obnoviteľných zdrojov energie, napríklad biopalív?
3) Aké zmeny životného štýlu si viete predstaviť za účelom zníženia vašej spotreby?

„Divočina ma priťahuje nie preto, že je divoká, ale preto, že je citlivá, logická, usporiadaná, stabilná, rezilientná. Divoká príroda obsahuje všetko, o čo zápasíme, aby sme to znovu získali… Výzvou a príležitosťou pre každého z nás je mať v srdci všetok život ako dar, vidieť jeho celok, opravdivo sa snažiť ho poznať a ujať sa ho s našimi mysľami, srdcami a rukami, aby sme obnovili jeho hojnosť.“

Carl Safina

5 Princípy organizácie zložitých živých systémov

Biologické aj ekologické systémy vytvárajú zložité siete a hierarchie pozostávajúce z početných a rozmanitých prvkov a ich väzieb. Túto úžasnú zložitosť možno pozorovať z pohľadu ich štruktúry, ako aj ich dynamiky, správania. Ako píše CAPRA (1997), *„porozumieť životu zo systémového hľadiska začína pochopením usporiadania“*. Štúdium zložitosti, komplexity živých systémov si vyžaduje ich multidisciplinárny a interdisciplinárny výskum, ktorý okrem fyziky, chémie, biológie a ekológie využíva aj nástroje matematiky, kybernetiky a informatiky. K základným východiskám tohto štúdia patrí predpoklad, že existujú určité **organizačné charakteristiky**, ktoré sú spoločné pre všetky úrovne organizácie živých systémov.

Hľadanie organizačných princípov života

Odhaduje sa, že na Zemi žije 5 až 10 miliónov druhov. Čo sa týka opísaných druhov, Červený zoznam IUCN uvádza ich odhad 2,14 milióna, reálnejší odhad je však 1,9 milióna. Najpočetnejšie sú kvitnúce rastliny (369 000 druhov) a hmyz (viac ako milión). V ekoregiónoch tropických dažďových pralesov v priemere rastie cez 3 100 druhov (často však až vyše 5 000 druhov na rozlohe 10 000 km^2).

Poznať detailne všetky populácie, medzidruhové interakcie, spoločenstvá, ekosystémy a dynamiku ich životných dráh a cyklov je nemožné. Aj preto je dôležité hľadať spoločné organizačné princípy týchto systémov, ktorých poznanie by nám malo pomôcť systémovo riešiť otázky udržateľného využívania a manažmentu biologických zdrojov, ekosystémov, krajín a Zemského ekosystému.

Rieka Mindo v tropickom dažďovom pralese v Andách, Ekvádor. Dynamika riečnej siete aj tu integruje organizmy, ekosystémy, aj celé krajiny. *Foto:* © Ladislav Hamerlík, 2009.

Existenciu týchto princípov indikuje napr. aj určitý opakovaný výskyt určitých tvarov, foriem a interakcií, rytmy opakovania procesov na rôznych hierarchických úrovniach a v rôznych priestorových mierkach organizácie hmoty, zjavný najmä v živých systémoch (napr. vetvenie žilnatiny listov, konárov stromov, horských chrbtov či riečnej siete). Pravidlá skryté v zdanlivom chaose prírody patria k zdrojom jej harmónie a krásy. Spoločné formy a princípy sa opakujú v rámci hierarchií (napr. usporiadanie buniek v tkanive), ale nájdeme ich aj medzi rôznymi hierarchickými úrovňami. Napr. všetky živé systémy závisia od viacmenej neustáleho prísunu energie, ktorú transformujú v zmysle 2. termodynamického zákona.

Ich zložitosť je tým väčšia, čím je väčší prísun energie (za podmienky dostupnosti ďalších prírodných zdrojov). Aj preto najzložitejšie a druhovo najbohatšie ekosystémy nájdeme v bióme tropických dažďových pralesov, kde vysoký prísun slnečnej energie počas celého roku a milióny rokov existencie relatívne stabilného prostredia viedli k vývoju najzložitejších energiu konvertujúcich štruktúr na Zemi. Vysoká zložitosť tu prekonáva aj problémy spôsobené špecifickým prostredím. Je napr. známe, že pôda týchto pralesov je chudobná na živiny, ktoré sú z nej vymývané prudkými dažďami. Príroda však aj tu našla riešenie v podobe rýchleho rozkladu odumretej organickej hmoty a tým aj rýchlejšieho obehu živín.

Paradoxne, obrovská zložitosť týchto pralesov spôsobuje, že po odlesnení veľkých území rýchlo dochádza k degradácii prostredia a obnova pralesov je nemožná. Ohrozuje ich aj rýchlosť globálnej zmeny klímy.

Upravené podľa: KAY 2000; KIER et al. 2005; LIN et al. 2010; IUCN 2020; PLESNÍK 2020

5.1. Celostnosť, chaos a zložitosť

Systémy predstavujú topologicky aj hierarchicky usporiadané siete prvkov, ktoré sú vo vzájomných interakciách. Tieto interakcie spôsobujú, že celku nemôžeme porozumieť iba na báze analytickej metódy podľa DESCARTESA (1992), dekompozíciou veľkého problému na dielčie, t.j. rozkladom celku na jednotlivé komponenty, štúdiom týchto dielčích jednotlivostí a sumáciou takto získaných poznatkov.

Jednou z reakcií na Descartesov redukcionizmus sa stal **holizmus, filozofia celostnosti**, spočívajúca v zameraní na vnímanie, skúmanie a porozumenie celku systému (ktoré je dôležité aj pre poznanie rolí jeho prvkov). Pojem prvý použil v roku 1926 juhoafrický politik **Jan Christiaan Smuts** (1870 – 1950) a do štúdia ekosystémov ho zaviedol ekológ **John Frederic Vicars Phillips** (1899 – 1987), ktorý tvrdil, že ekologické spoločenstvá sú harmonické, čím podporil Clementsovu predstavu spoločenstva ako superorganizmu (VANDERMEER & PERFECTO 2018). Holizmus v juhoafrickom vydaní sa však rýchlo zdiskreditoval, pretože bol zneužitý na podporu apartheidu (politiky rasovej oddelenosti).

5.1.1 Zložitý živý systém na hrane chaosu

Holistické snahy vychádzať z uchopenia a porozumenia celku (dnes veľmi populárne napr. v alternatívnej medicíne) zatiaľ veľa praktických výsledkov nepriniesli. Ide o to, že živé systémy sú spravidla veľmi zložité. Navyše, ako indikuje počítačové modelovanie, **organizmy aj ekosystémy môžu fungovať aj „na hrane chaosu“**. O chaotickom systéme hovoríme vtedy, ak sa hodnoty jeho stavových premenných menia náhodne, čím sa stáva chaotickým a jeho správanie nepredvídateľným.

Aj jednoduchý dynamický systém môže mať veľmi zložité až chaotické správanie, čo na príklade troch pohybujúcich sa telies, ktoré na seba pôsobia gravitáciou, preukázal koncom 19. storočia francúzsky matematik a teoretický fyzik **Henry Poincaré** (1854 – 1912), čím položil základy teórie chaosu. O viac ako polstoročie neskôr americký matematik a meteorológ **Edward Lorenz** (1917 – 2008) oživil záujem o túto teóriu objavom, že aj veľmi jednoduchý model počasia (ktorý vytvoril s pomocou iba troch nelineárnych rovníc) je extrémne citlivý na počiatočné podmienky. Významnou súčasťou teórie chaosu je aj fraktálna geometria amerického matematika **Benoita Mandelbrota** (1924 – 2010), ktorá spočíva v opakovaní podobných foriem na rôznych úrovniach ich pozorovania (pozri kap. 2.1). (Dobrý prehľad histórie vývoja teórie chaosu prezentujú napr. CAPRA 1997 a OESTREICHER 2009.)

Teória chaosu je dnes dôležitou matematickou disciplínou, ktorá sa venuje štúdiu dynamických systémov, ktorých stavy sa menia náhodne. Príkladmi takýchto systémov sú tok vody v rieke, morské vlny, počasie, klíma, oscilácie populácií v ekosystéme, ale aj let kŕdľa vtákov alebo migrácia obrovských stád pakoňov v africkej savane. Takéto systémy sú extrémne citlivé na počiatočné podmienky, t.j. aj malá zmena stavových premenných môže výrazne zmeniť správanie systému (napr. už malá zmena hodnôt meteorologických premenných môže zmeniť priebeh počasia). Cieľom teórie chaosu je hľadanie jednoduchých pravidiel a vzorcov, ktoré sú skryté za zložitosťou prírodných systémov (využíva sa pritom tiež fraktálna geometria, koncepcia zvláštnych atraktorov a iné, CAPRA 1997).

Aj za zjavne silne náhodným, chaotickým správaním zložitých dynamických systémov totiž môžeme nájsť určité **pevné pravidlá**, ktoré toto správanie generujú. Patria medzi ne napr. pravidlá a charakteristiky interakcií prvkov systému, jeho spätné väzby, autoorganizačné a autoregulačné mechanizmy, ako aj existencia polarít v prírode. Známym príkladom sú kvázi-synchronizované lety škorcov v kŕdľoch obsahujúcich stovky až tisíce jedincov, vytvárajúce „mraky“ škorcov, ktoré veľmi chaoticky menia svoj tvar. Tento chaos je však generovaný iba niekoľkými jednoduchými pravidlami pohybu jednotlivých škorcov vnútri kŕdľa: 1) snahou premiestniť sa určitým smerom, 2 snahou držať sa čo najbližšie stredu kŕdľa, 3) snahou držať sa od iných škorcov v bezpečnej vzdialenosti (VANDERMEER & PERFECTO 2018). Prepadnutiu do úplného chaosu, pri ktorom by sa v tomto prípade vtáky zrážali, tu zabraňujú početné spätné väzby, prostredníctvom ktorých jednotlivé jedince korigujú výšku, smer a rýchlosť svojho letu.

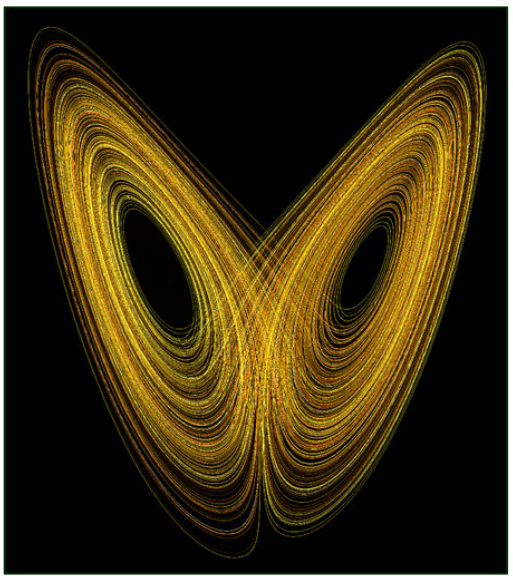
Početné príklady chaosu, ktoré možno nájsť v prírode indikujú, že chaos je dôležitý aj v biologických a ekologických systémoch. Podľa Roberta Pola (in TOKER et al. 2020) v prípade vyšších skupín organizmov práve *„chaos zabezpečuje určitú zdravú flexibilitu orgánov, napr. srdca, mozgu a ďalších častí tela*". Analogický význam môže mať chaos aj v ekosystéme, kde početné interakcie organizmov vytvárajú zložitú interakčnú sieť. Správanie jej komponentov je vysoko dynamické a javí sa skôr chaotické ako pravidelné – napr. zväčša chaotické oscilácie veľkosti populácií jednotlivých druhov herbivorov, ktoré závisia od meniacej sa dostupnosti potravy a od zmien tlaku ich predátorov, resp. lovu.

To, či vôbec a kedy v ekosystéme nastanú interakcie konkrétnych jedincov rovnakého alebo rôznych druhov, môžeme opísať iba na báze pravdepodobností. Na druhej strane aj tento zdanlivo vysoký chaos je generovaný deterministickými pravidlami interakcií druhov na rovnakej trofickej úrovni (napr. konkurencieschopnosť), alebo na rôznych trofických úrovniach (napr. konzumácia rastlín herbivormi, herbivorov karnivormi, atď. až po vrcholových predátorov konzumujúcich karnivory). Dôležité je, že práve kombinácia týchto pevných pravidiel a chaotických oscilácií populácií v konečnom dôsledku vedie k vytvoreniu a udržiavaniu vysoko organizovaného živého systému, s vysokou dynamikou. Prepadnutiu do úplného chaosu aj v tomto prípade zabraňujú početné spätné väzby, ktoré udržiavajú vnútornú dynamickú rovnováhu systému. Správanie celku ekosystému je silne nelineárne a ťažko predvídateľné.

Atraktory, portréty správania vysoko dynamického systému

Teória chaosu je nástrojom štúdia správania sa takých systémov, ktoré charakterizuje **extrémna citlivosť k počiatočným podmienkam,** preto je ich správanie ťažko predvídateľné, hoci môžeme rozpoznať jeho určité trendy (KAY 2000). Za týmto účelom sa niekedy hodnoty premenných systému zobrazujú v abstraktnom fázovom priestore, v ktorom každej premennej zodpovedá jedna súradnica a v priestore vykresľované body zodpovedajú jednotlivým stavom systému. Dynamiku systému potom charakterizujú geometrické obrazce, do ktorých systém smeruje, tzv. **podivné atraktory**, vytvárané nestabilnými periodickými orbitálnymi dráhami postupností stavov systému vo fázovom priestore.

Takýmto spôsobom sa pred zhruba polstoročím pokúsil opísať jednoduchý konvekčný proces v atmosfére aj Edward Lorenz. Výsledkom jeho úsilia bol atraktor v tvare krídel motýľa (nazývaný aj Lorenzov atraktor), ktorý ho viedol k metafore **„efektu motýlích krídel"** – rozvírenie vzduchu krídlami motýľa v Amazónii môže spôsobiť tropický cyklón tisíce kilometrov odtiaľ.



Obr. 5.1. Lorenzov atraktor.
Zdroj: Wikimol, 2005, Public Domain.

V tejto metafore ide o poukázanie na to, že aj extrémne malá zmena počiatočných podmienok môže spôsobiť rozsiahlu zmenu správania dynamického systému. Lorenz zistil, že základné charakteristiky orbitálnych dráh v jeho trojfázovom priestore sa opakujú, napriek tomu, že tieto dráhy nie sú presne koncentrické. Blízke stavy systému (blízke body vo fázovom priestore) sú si tu blízke aj na ďalších dráhach, ale v dôsledku iných počiatočných podmienok nie sú identické (BOCCATELLI et al. 2000). To znamená, že napriek tomu, že ide o rôzne stavy systému, ich priebeh vykresľuje podobný tvar (obr. 5.1). Atraktor je teda stav, presnejšie postupnosť stavov, do ktorých je systém priťahovaný. Napr. v horskej krajine môžu vodné toky v závislosti od reliéfu tiecť rôznymi smermi, ale tok vody je vždy atrahovaný až na dno doliny.

Vysoko dynamické nelineárne systémy preto neumožňujú prognózovať ich dlhodobé správanie, čo je zjavné napr. pri predpovedaní počasia – pravdepodobnosť správnosti predpovede už po niekoľkých dňoch výrazne klesá. Atraktor ako **geometrický portrét dynamiky systému** hovorí, že aj keď daný systém nemožno opísať v detailoch, môžeme skúmať kvali-

tatívne aspekty jeho správania a jeho trendy, čo je pre prognózovanie a manažment systému podstatné (CAPRA 1997; BOCCATELLI et al. 2000). Napríklad v ekosystéme je takýmto trendom ekologická sukcesia alebo obnova (reorganizácia) biotického spoločenstva po odoznení jeho narušenia. Na druhej strane, takouto obnovou vzniknuté spoločenstvo a sukcesný proces nikdy nie sú presnou kópiou toho predchádzajúceho, každý sukcesný proces však sleduje jeho určitý atraktor (smerovanie ku klimaxu).

Základné aspekty a zdroje zložitosti

Napriek tomu, že aj systémy s jednoduchou štruktúrou sa môžu správať chaoticky, táto charakteristika je viac typická pre zložité systémy. Zložitosť systému má dva piliere: prvým je **organizácia fyzickej štruktúry v priestore**, ktorá spočíva vo variabilite určitých typov prvkov, ako aj väzieb medzi nimi a súčasne v ich účelnom opakovaní a priestorovom rozmiestnení. Druhým pilierom je **organizácia interakcií, procesov a funkcií v čase**, ktorá spočíva v opakovaní určitých typov interakcií a procesov realizovaných na fyzickej štruktúre. Obe charakteristiky platia pre systémy živej aj neživej prírody (napr. kryštály). Zložitosť systémov v živej prírode je však spravidla až o mnoho rádov vyššia, preto je tu aj zjavnejšia. Napríklad FISHER & PRUITT (2020) podrobne približujú osem významných charakteristík zložitosti, ktoré aplikujú na štúdium dynamiky a evolúcie populácií vybraných skupín živočíchov: ich hierarchickú organizáciu, heterogenitu, autoorganizáciu, otvorenosť, adaptáciu, existenciu pamäte, nelinearitu a neurčitosť.

Z kapitoly 2 už vieme, že ontogenetický aj evolučný vývoj biologických aj ekologických systémov zväčša **charakterizuje spontánny trend k rastu zložitosti** (PROULX 2007). Tento rast sa prejavuje predovšetkým v dvoch hlavných smeroch. Prvým je zvyšovanie zložitosti fyzickej štruktúry (napr. počty a rozmanitosť buniek v pletivách rastlín alebo veľkosti populácií a rozmanitosť druhov v spoločenstve). Druhým smerom je rast zložitosti na tejto štruktúre realizovaných procesov (napr. fotosyntéza, toky energie, cykly biogeochemických prvkov) a tým aj rast zložitosti správania systému ako celku. Tu treba uviesť, že čím je zložitosť systému vyššia, tým je aj ťažšie kvantifikovateľná (YATES 1994).

Za primárny zdroj tejto zložitosti, vysokého usporiadania živých systémov (v zdanlivom chaose prírody, ktorá nás obklopuje) sa považujú interakcie medzi prvkami systému navzájom, aj interakcie s ich prostredím (LÉVÉQUE & MOUNOLOU 2003) a ich zreťazením vytvárané procesy (napr. tok rieky) či spätné väzby. Tieto procesy integrujú prvky fyzickej štruktúry do funkčného, vysoko integrovaného celku a súčasne vytvárajú špecifické morfologické, fyziologické a behaviorálne zákonitosti a vzory, obrazce systému (angl. „*patterns*“ – STARR et al. 2013). Tým determinujú aj ich funkcie - napr. výstavba pletív zelených rastlín, tvary listov, veľkosť listovej plochy a rôzne typy fotosyntézy výrazne determinujú ich primárnu produkciu.

Hranicu medzi vývojom zložitých anorganických a zložitých živých systémov predstavuje práve vznik **biologickej reprodukcie, mechanizmu odovzdávania vlastností potomkom** organizmu ako nevyhnutnej podmienky pokračovania života (BUCHAR et al. 1987). Kým mnohé iné životné funkcie organizmy v procese adaptácie k svojmu prostrediu v rámci prírodného výberu obmedzujú, rozvíjajú, a vznikajú nové vlastnosti, základný mechanizmus autoreprodukcie ako odovzdávania genetickej informácie zapísanej v DNA bunky všetkým jej dcérskym bunkám ostal zachovaný počas 3,8 mld rokov biologickej evolúcie.

Ontická otvorenosť živých systémov

Vysoká zložitosť biologických a ekologických systémov znamená aj vysokú mieru neurčitosti až chaotickosti ich správania, čo sťažuje ich výskum a limituje ich poznateľnosť. K precíznemu predpovedaniu ich správania nám chýba detailné poznanie štruktúry a počiatočných podmienok vývoja.

JØRGENSEN a SVIREZHEV (2004) z vysokej zložitosti prírody odvodzujú jej ontickú otvorenosť (ontológia je disciplína filozofie, ktorá sa zaoberá bytím, onticky otvorený teda znamená s predom nedeterminovaným bytím a teda aj vývojom): *„Je možné, že svet je onticky otvorený (= nedeterministický), pretože vesmír bol vytvorený ako onticky otvorený (= nedeterministický), nakoľko príroda je príliš zložitá na to, aby nám umožnila poznať rozumnú časť počiatočných podmienok aspoň v prípade subsystému ekosystému...“*

5.2 Základné organizačné a regulačné mechanizmy

V kapitole 2 sme už priblížili niektoré mechanizmy organizácie zložitých systémov – fyzickú štruktúru systému, jej prvky, väzby a hranice, interakcie a procesy, cykly a siete (napr. siete populácií druhov vo „vertikálnej" trofickej sieti ekosystému alebo siete miestnych populácií druhu v horizontálnej metapopulačnej sieti). Vieme tiež, že všetky živé systémy sú **organizačne pomerne uzavreté, ale súčasne musia byť termodynamicky otvorené**, pretože import energie je podmienkou existencie ich štruktúr a prebiehajúcich procesov. Tu ich priblížime detailnejšie a predstavíme si ďalšie organizačné princípy.

5.2.1 Od cyklov k spätným väzbám

Interakcie, procesy, cykly a spätné väzby spontánne modulujú fyzickú štruktúru aj dynamiku systému. **Ekologické cykly** spočívajú v rytmickom zokruhovaní a opakovaní postupností interakcií (procesov) v rámci autopoietických ekologických sietí a s tým spojenými tokmi energie a obehom živín medzi ich rôznymi zásobníkmi. (Patria sem aj všetky biogeochemické cykly.)

Autokatalytické cykly

Zložité cykly, ktoré spájajú sebareplikujúce sa entity sa nazývajú **autokatalytické cykly**. Rozdiel oproti bežnému cyklu je tu v schopnosti sebareplikácie komponentov tohto cyklu, ktoré sa tým vzájomne posilňujú. (Biochemik Eigen zaviedol pojem autokatalytického hypercyklu keď na báze autokatalytických sebareplikujúcich sa makromolekulárnych cyklov vysvetľoval vznik živej bunky – CAPRA 1997).

Obr. 5.2. Jednoduchý hypotetický autokatalytický hypercyklus rozvíjajúci sa na báze kladnej spätnej väzby. *Schéma:* Peter Sabo.

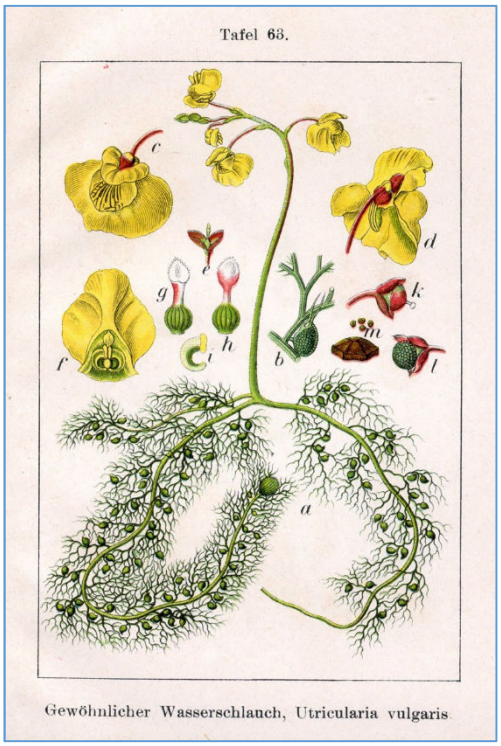
Na úrovni ekosystému môže byť príkladom autokatalytického cyklu napr. prepojenie medzi biomasou rastlín, herbivorov, karnivorov a detritom. Na prvý pohľad to znamená, že čím viac bude biomasy, tým viac môže byť aj detritu, ktorého rozklad znamená viac živín v pôde pre rastliny a teda aj lepšie podmienky pre rozvoj biomasy (obr. 5.3).

Iným príkladom je skupina druhov patriaca k najsofistikovanejším mäsožravým rastlinám, rod bublinatka (*Utricularia* spp., obr. 3.2). Druhy bublinatky žijúce vo vode nemajú korene a živiny prijímajú celým povrchom tela a vo vode splývajú. Vytvárajú dlhé byle, ktoré sú husto listnaté, pričom sperené listy sú delené až na niťovité úkrojky, čím sa zväčšuje styčná plocha rastliny s vodou. Na povrchu týchto listov sa však (podobne ako na skalách a inom substráte vo vode) zachytáva perifytón, ktorý tvoria riasy, sinice a baktérie. Tento perifytón je konzumovaný zooplanktónom a inými drobnými vodnými živočíchmi. Bublinatky zooplanktón a ďalšie drobné živočíchy chytajú do dômyselných pascí – veľmi početných lapacích mechúrikov čím sa autokatalytický cyklus uzatvára (FATH 2014; dos SANTOS et al. 2018). V oboch príkladoch jedna skupina druhov zlepšuje podmienky pre prosperitu iných skupín druhov (WILKINSON 2007).

Uvedené príklady sú ukážkou kladnej spätnej väzby, ktorá vedie k lavínovitému rozvoju početnosti prvkov a kapacity procesov prebiehajúcich v danom systéme. Avšak vidíme, že v tomto prípade niečo nesedí, že realita je iná. Ekosystémy sú totiž oveľa zložitejšie, pričom kladné spätné väzby sú v nich vždy zosieťované so zápornými spätnými väzbami (napríklad v prvom prípade ide o znižovanie primárnej produkcie pôsobením herbivorov ako aj o znižovanie biomasy herbivorov pôsobením karnivorov). To umožňuje vzájomné vyvažovanie pôsobenia rôznych typov spätných väzieb a spravidla zabraňuje katastrofickému vývoju, ktorý by prebiehal, ak by kladné spätné väzby pôsobili izolovane.

Spätná väzba

Princíp spätnej väzby prvý opísal Norbert Wiener (1965). Ide o kľúčový organizačný mechanizmus, ktorý umožňuje dynamiku systému aj jeho adaptáciu k meniacim sa podmienkam. Predstavuje **špecifickú kauzálnu slučku** ako kruhové usporiadanie postupnosti kauzálne spojených prvkov, z ktorých posledný prvok ovplyvňuje počiatočný prvok, čím sa spätná väzba uzatvára (WIENER 1965; CAPRA 1997). Zmena premennej „a“ na počiatku tohto kruhového mechanizmu vyvolá takú reakciu (alebo postupnosť reakcií), ktorá vedie k zmene premennej „b“ na konci tohto mechanizmu a zmena tejto premennej posilní al ebo zoslabí pôvodnú zmenu premennej „a“ počiatočného prvku kruhovej väzby.



Obr. 5.3. Bublinatka obyčajná (*Utricularia vulgaris*), vodná rastlina s cirkumpolárnym rozšírením, zaradená u nás v kategórii NT – takmer ohrozený druh. *Autor:* Johann Georg Sturm, *maliar:* Jacob Sturm, 1796. *Zdroj:* Ilustrácia z knihy *Deutschlands Flora in Abbildungen,* http://www.biolib.de, Public Domain.

Výstup systému teda spätne ovplyvňuje jeho vstup. Podľa účinku rozlišujeme **kladnú spätnú väzbu**, ktorá zosilňuje vstup do systému a **zápornú spätnú väzbu**, ktorá vstup do systému zoslabuje. (Pozor, tieto označenia neznamenajú „dobrú“ alebo „zlú“ väzbu.)

Siete vzájomne prepojených spätnoväzobných riadiacich procesov sú základom pre pôsobenie autoorganizačných a autoregulačných mechanizmov každého biologického a ekologického systému. Kým na jednej strane kladné spätné väzby umožňujú jeho rozvoj, rast, dospievanie a reprodukciu, na druhej strane záporné spätné väzby obmedzujú autonómnosť prvkov systému za účelom udržania integrity a funkčnosti celku, preto ich nazývame aj stabilizačné (v ekosystéme a v krajine ekostabilizačné).

Kladná spätná väzba

Kladná spätná väzba znamená, že zmena hodnoty premennej „a“ na počiatku spätnoväzobného okruhu vedie k takej zmene hodnoty premennej „b“ na jeho konci, ktorá ďalej zosilní zmenu „a“ na počiatku tohto okruhu. Kladná spätná väzba na jednej strane umožňuje vývoj ďalšieho usporiadania systému (napr. rast organizmu), môže ale spôsobiť aj jeho nestabilitu – porucha na vstupe destabilizujúca systém sa totiž jej prostredníctvom zväčšuje.

Početné **príklady kladnej spätnej väzby** súvisia aj so zmenou klímy. Napr. v dôsledku globálneho otepľovania sa topí arktický aj antarktický oceánsky ľad. To znižuje albedo zemského povrchu (podiel ním odrážaného slnečného žiarenia voči prichádzajúcemu žiareniu). Kým albedo snehu je až 0,80 – 0,95 a oceánskeho ľadu 0,5 – 0,7, albedo vody sa vo vysokých zemepisných šírkach pohybuje iba v hodnotách 0,1 až 0,35, v závislosti od uhlu dopadu slnečných lúčov (COGLEY 1979). V dôsledku roztápania ľadovej pokrývky preto príslušné oblasti oceánov prijímajú až násobne viac slnečnej energie, čím sa otepľovanie ďalej zosilňuje a zrýchľuje. Iným príkladom je topenie permafrostu v dôsledku otepľovania pásiem boreálneho lesa a tundry. Tým sa do atmosféry uvoľňujú obrovské množstvá metánu (CH_4), významného skleníkového plynu, ktorého molekula má oproti oxidu uhličitému (CO_2) až 23-násobne vyšší otepľujúci potenciál. V dôsledku zosilnenia skleníkového efektu sa globálne otepľovanie ešte viac zosilňuje.

Ďalšie kladné spätné väzby spojené so zmenou klímy zahŕňajú napr. uvoľňovanie CO_2 pri rozklade rašeliny vo vysychajúcich rašeliniskách, ale aj panické opatrenia vo vystrašenej spoločnosti, ako je napr. snaha za každú cenu nahradiť fosílne palivá biopalivami aj na úkor ničenia lesov a ornej pôdy, čo v konečnom dôsledku otepľovanie iba urýchľuje a navyše vedie k obrovským stratám biodiverzity.

Existencia spätných väzieb prispieva k tomu, že **zložité systémy sa správajú nelineárne**. To tiež znamená, že postupný rast antropogénneho tlaku na ekosystémy Zeme nemusí viesť k ich kontinuálne postupujúcej degradácii, ale naopak, môže viesť k náhlym zmenám ich stavu a správania, čo môže mať pre našu civilizáciu nedozierne následky. Príkladom je riziko savanizácie Amazónskeho pralesa.

Príklad autokatalytického cyklu posilňovania zmeny klímy v Amazónii

Príkladom nebezpečného hypercyklu na báze kladných spätných väzieb medzi globálnou zmenou klímy a odlesňovaním je riziko straty život podporujúcich a regulačných ekosystémových služieb, ktoré dnes poskytuje ľudstvu amazonský dažďový prales. K najvýznamnejším z nich patrí mimoriadne vysoká biodiverzita a zásadný podiel Amazónie na fungovaní biogeochemických cyklov, je globálne významným absorbérom skleníkového plynu oxidu uhličitého (CO_2) a regulátorom klímy.

Ako však naznačujú výskumy, **pri dlhotrvajúcom suchu a vysokej teplote sa prales v dôsledku zvýšeného rozkladu organickej látky mení z absorbéra CO_2 na jeho zdroj**. Napr. počas období storočného sucha, ktoré v roku 2005 viedlo k extrémne nízkym zrážkam na 37 % rozlohy Amazónie a v roku 2010 až na 57 % sa v pralese spomalil rast vegetácie, výrazne stúpla úmrtnosť stromov a rozklad ich odumretej biomasy; podľa meraní a počítačových modelov boli výslednou uhlíkovou bilanciou pralesa v daných obdobiach emisie 1,6 resp. 2,2 miliardy ton uhlíka do atmosféry (LEWIS et al. 2011). Kladný spätnoväzobný okruh sa v tomto prípade začína globálnym otepľovaním, ktoré vedie k vyšším osciláciám klimatického systému, ktorého súčasťou sú aj dlhé obdobia sucha v Amazónii. Počas nich sa tento najväčší dažďový prales na Zemi mení z absorbéra CO_2 na jeho významný zdroj, a táto premena prispieva k zosilneniu skleníkového efektu atmosféry a tým k ešte vyššiemu globálnemu otepľovaniu.

Takáto zásadná zmena nemôže ostať bez odozvy a vysoko pravdepodobne môže zmanenať nielen častý výskyt period extrémneho dlhotrvajúceho sucha, ale aj celkovú zmenu klímy tohto biómu a tým aj biómu samotného. Možné je to už v súčasnosti pozorovať na suchších okrajových zónach jeho východných oblastí – pri zrážkach nižších ako 1 500 mm ročne tu už nastupuje savana (MALHI et al. 2009). Vážnym problémom je tiež **synergické pôsobenie rozsiahleho odlesňovania a zmeny klímy**, koré spolu znižujú rezilienciu pralesa voči disturbanciám**.** V súčasnosti je už odlesnených cca 20 % pôvodnej rozlohy tohto pralesa, čo okrem priamej likvidácie biotopov a ekosystémov znamená aj ich rozsiahlu fragmentáciu a degradáciu. Kvantitatívne odhady hovoria o tom, že hranicou rýchlej a nezvratnej premeny tohto dažďového pralesa na savanu môže byť odlesnenie 40 % jeho rozlohy resp. zvýšenie globálnej priemernej teploty o 3 až 4 °C (NOBRE & BORMA 2009).

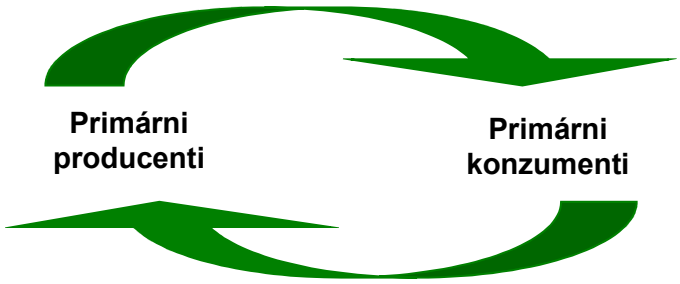
Uvedené **riziko „savanizácie" amazonského dažďového pralesa v prizme** teórie komplexity znamená prechod extrémne zložitého systému tohto pralesa a s ním zviazanej regionálnej klímy do nového ekologicky kvázi-rovnovážneho stavu, ktorý by sa vyznačoval nízkym zastúpením stromov a pravdepodobne by prispel k ešte rýchlejšiemu globálnemu otepľovaniu – v dôsledku nižšej absorpcie CO_2 z atmosféry savanou ako dažďovým pralesom, nižšieho ochladzujúceho efektu vegetácie savany voči ochladzujúcemu efektu pralesa a významného narušenia veľkého vodného cyklu. Navyše premena najväčšieho dažďového pralesa na svete na savanu môže vyvolať kaskádu ďalších regionálnych alebo globálnych zmien, ktoré najskôr nebudú priaznivé pre existenciu a prosperitu ľudskej spoločnosti.

Záporná spätná väzba (stabilizačná)

Autokatalytické hypercykly, ktoré pozostávajú iba z kladných spätných väzieb, sa v prírode vyskytujú iba zriedka, alebo mávajú iba dočasné trvanie. Katastrofickému vývoju totiž zabraňuje ďalší typ spätnej väzby. Táto pôsobí v systéme takým spôsobom, že zmena hodnoty premennej „b" na konci kruhového spätnoväzbového mechanizmu tlmí zmenu hodnoty premennej „a" na jeho počiatku, ktorá zmenu „b" vyvolala, a preto sa nazýva **záporná spätná väzba** (CAPRA 1997, obr. 5.4). Záporná spätná väzba teda v prírode pôsobí komplementárne ku kladnej spätnej väzbe. Je kritická pre udržanie vnútornej homeostázy organizmov aj ekologickej rovnováhy ekosystémov, preto sa nazýva aj stabilizačnou väzbou.

Príkladom je nárast populácie herbivorov pri zvýšení objemu fytomasy, ktorú spásajú, čím znižujú jej objem, čo vedie k redukcii až potlačeniu ďalšieho nárastu. Alebo príklad nárastu populácie predátorov po populačnom výbuchu ich koristi, ktorý vedie k zníženiu veľkosti populácie ich koristi.

Treba vidieť, že potlačenie populačného výbuchu druhu jeho predátormi trvá určitú dobu (kým sa zvýši početnosť ich populácií), neprejaví sa preto ihneď. Dynamika vzťahu korisť – predátor v konečnom dôsledku znamená aj ozdravenie populácie koristi tlakom predácie, v ktorej prežijú najmä zdraví a životaschopní jedinci. Vidíme, že záporná spätná väzba je **kľúčovým ekostabilizačným činiteľom**. V živých systémoch pravdepodobne existujú tisíce takýchto stabilizačných spätných väzieb.



Obr. 5.4. Záporná spätná väzba. Príklad rastlinnej biomasy v dôsledku pôsobenia gildy bylinožravcov. Analogickým príkladom je stabilizácia populácie koristi tlakom populácie predátora. *Schéma:* Peter Sabo.

Učebnicovým príkladom dynamiky vzťahu predátora a koristi sú oscilácie početnosti populácií zajaca snežného (*Lepus americanus*) a rysa kanadského (*Lynx canadensis*) v zhruba 10 ročných cykloch, v rámci ktorých populácia tohto druhu zajaca môže klesnúť z 10 tisíc jedincov na menej ako 3 jedince na míľu štvorcovú. Napriek tomu nikdy nie je decimovaná natoľko, aby druh vyhynul. Ekológovia (KREBS et al. 2001) to vysvetľujú tým, že zajac snežný využíva niku, v ktorej má málo konkurentov, preto má vysoké prírastky a vytvára potravné niky pre rozmanitých predátorov – pre rysy, vlkov, kojoty, líšky, kuny, orly, jastraby, sovy a iné (niku ako postavenie, zamestnanie druhu v ekosystéme približujeme v 2. diele učebnice). Za tri hlavné faktory populačného cyklu zajaca považujú predovšetkým dostupnosť potravy, predáciu a sociálne faktory.

Gradácie populácie zajaca zvyšujú početnosť rysa a jeho zvýšený tlak potláča populáciu zajaca (záporná spätná väzba), čím následne klesá aj populácia rysa. Na základe takmer 200 ročnej evidencie lovcami predávaných koží ekológovia potvrdili výskyt tohto cyklu v boreálnych lesoch Kanady a Aljašky. Dostupnosť potravy pre zajaca snežného môže súvisieť s chemickou ochranou drevín pred zimným požerom, s cyklami slnečnej aktivity, lesnými požiarmi aj periodickými gradáciami jeho populácie (STORCH & MIHULKA 2000). Pri zníženej dostupnosti potravy je jeho oslabená populácia ľahkou korisťou predátorov, ktoré sa podieľajú na mortalite zajacov až 95 % (KREBS et al. 2001). Vývoj vzájomných reakcií tohto zajaca a rysa dobre ilustruje ich dlhodobé „*preteky v zbrojení*“. Vysoký predačný tlak viedol k mnohým evolučným adaptáciám zajaca snežného, ako sú najmä dlhé nohy a rýchly beh, vysoko citlivé uši, mimikry v podobe bielej

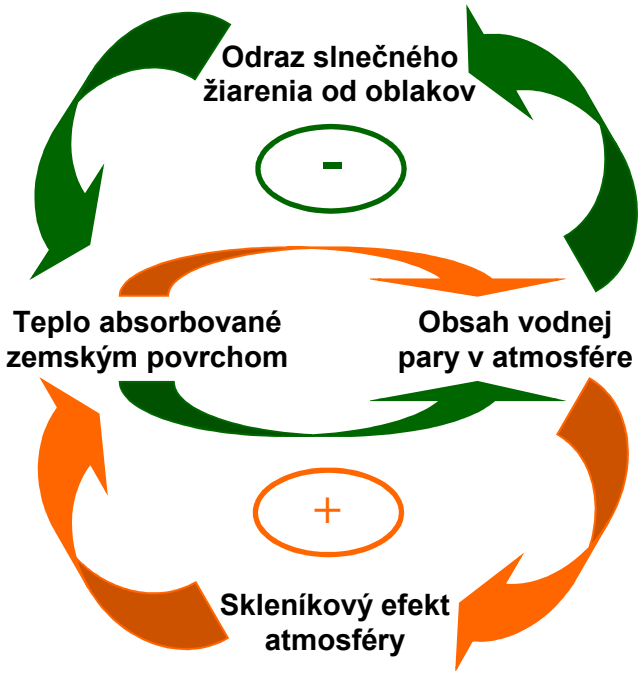
Obr. 5.5. a) Rys kanadský (*Lynx canadensis*), b) Zajac snežný (*Lepus americanus*).
Foto: 5.5.a: Keith Williams, 2010. *Zdroj:* Flickr, Wikimedia Commons, Creative Commons BY 2.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lynx_Canadensis.jpg. *Foto 5.5 b:* Alan Schmierer, 2013. *Zdroj:* Flickr, Wikimedia, CC0 1.0, Public Domain, https://www.flickr.com/photos/sloalan/9592453799/.

zimnej a hnedej letnej srsti a iné. Z predátorov sa na jeho lov najlepšie adaptoval práve rys kanadský, ktorý sa na tohto zajaca potravne špecializuje a je jeho najvýznamnejším predátorom.

Zložitosť spätných väzieb a časové oneskorenie

Príkladom kombinácie rôznych typov spätných väzieb vo vzťahu ku globálnemu otepľovaniu je zvýšený výpar z oceánov, ktorý vedie k väčšiemu obsahu vody v atmosfére a tým k vyšším zrážkam aj v polárnych oblastiach, kde snehová pokrývka zvyšuje albedo zemského povrchu a tým znižuje prijem slnečného žiarenia – princíp zápornej spätnej väzby (ktorá je tu však vzhľadom k opačnému trendu – prevládajúcemu topeniu sa oceánskeho ľadu a Grónskeho ľadovca – slabá). Väčší výpar a viac vodnej pary v atmosfére súčasne znamená aj väčší podiel slnečnej exergie odrazenej od oblakov, čiže uplatňuje sa tu aj ďalšia záporná spätná väzba.

Vodná para je však súčasne aj najvýznamnejší prirodzený skleníkový plyn, takže zvyšovanie koncentrácie vodnej pary v atmosfére výrazne zosilňuje skleníkový efekt atmosféry, teda uplatňuje sa tu aj kladná spätná väzba. Vidíme, že zmena hodnoty jedinej premennej môže vyvolať viac kladných aj záporných spätných väzieb, ktoré bývajú zreťazené v zložitých okruhoch (obr. 5.6). Takýto systém sa nevyhnutne správa nelineárne.



Obr. 5.6. Rozdielne typy spätnej väzby spojené so zmenami hodnoty tej istej premennej. Zvýšenie tepla absorbovaného zemským povrchom vedie k zvýšeniu obsahu vodných pár v atmosfére, čo vedie k zmenám ďalších premenných, ktoré uzatvárajú kladný, resp. záporný spätnoväzobný okruh. *Schéma:* © Peter Sabo.

Časové oneskorenie v spätnoväzobných okruhoch spôsobuje, že **ekostabilizačný vplyv zápornej spätnej väzby sa v ekosystémoch neprejaví ihneď**. Platí to aj obrátene, o deštrukčných vplyvoch rôznych ľudských zásahov a s nimi často spojenej kladnej spätnej väzby. To znamená, že o vplyvoch nových technológií a nových ľudských aktivít, napr. v dôsledku rozširovania lyžiarskeho strediska v horskom území alebo v dôsledku premeny tropického dažďového pralesa na monokultúry palmy olejovej (pozri kapitolu 4.3.1) na organizmy, ekosystémy a život udržiavajúce procesy sa dozvedáme až po určitom období ich využívania.

Organizmy aj ekosystémy síce dokážu do určitej miery odolávať narušeniu zvonku (táto ich vlastnosť sa nazýva rezistencia) a dokážu byť aj schopné obnovy po jeho odoznení (reziliencia), avšak už nemusí ísť o návrat do pôvodného stavu (ULANOWICZ 1999).

5.2.2 Základné princípy autoorganizácie a autoregulácie

Autoorganizácia a autoregulácia predstavujú dva základné polárne princípy, resp. dva vzájomne komplementárne mechanizmy vývoja zložitých živých systémov a udržania ich dosiahnutého usporiadania.

Autoorganizácia: spontánny vznik a vývoj usporiadanosti

Autoorganizácia (alebo **samoorganizácia**) označuje spontánny vznik a vývoj organizovaných fyzických štruktúr a na nich prebiehajúcich procesov a funkcií, pričom zdrojom tohto vývoja sú početné interakcie prvkov systému (HEYLIGHEN 1989). **Spontánnosť** tu znamená, že ide o autonómny, samovoľný proces, ktorý nie je riadený zvonku systému. Tento proces prebieha podľa určitých pravidiel, môžeme

v ňom vypozorovať určité spoločné princípy, bez ohľadu na hierarchickú úroveň. Patrí sem napr. určitý kritický počet a rozmanitosť prvkov, ktoré vstupujú do interakcií, hierarchická organizácia systémov, nelinearita ich správania, emergentné vlastnosti a pod.

Usporiadané štruktúry a procesy vznikajú interakciami prvkov neusporiadaného (alebo menej usporiadaného) súboru, pričom správanie vznikajúceho alebo rozvíjajúceho sa systému smeruje k určitému atraktoru. S istým zjednodušením sa dá povedať, že z „mora chaosu" sa vynárajú „ostrovy usporiadania" ako systémy vzájomne prepojených, interagujúcich a do funkčného celku integrovaných prvkov (CAPRA 1997).

Autoorganizácia sa prejavuje ako **tendencia rastu zložitosti systému**, či už ide o neživú prírodu (napr. kryštály, konvekčné slučky zohrievanej vody, zoskupovanie atómov a molekúl v chemických zlúčeninách), alebo o vysoko usporiadané biologické a ekologické systémy. V prírode síce nájdeme aj ukážky cesty k jednoduchosti (napr. rovnobežná žilnatina listo jednoklíčnolistých rastlín, oproti vývojovo starším dvojklíčnolistým rastlinám), ale vo všeobecnosti prevažuje tendencia k rastu zložitosti.

Z hľadiska termodynamickej teórie je podstatou autoorganizácie vyrovnávanie sa s prísunom energie do systému prostredníctvom vytvárania adekvátnych (tzv. disipatívnych) štruktúr a procesov, ktoré túto energiu dokážu transformovať, konzervovať a využiť. Podobne aj vývoju zložitejšieho usporiadania z jednoduchšieho spravidla predchádza „obdobie chaosu", poruchy správania systému, ktorých prejavom sú zvýšené oscilácie hodnôt kritických premenných daného systému. Základným mechanizmom, ktorý zvyšuje amplitúdy porúch je **kladná spätná väzba.** Po prekročení kritického rozsahu oscilácií môže systém náhle prejsť do nového usporiadania.

Tri základné procesy autoorganizácie

Tri základné procesy autoorganizácie SASAI (2013) definoval síce pre úroveň tkaniva, domnievame sa však, že ich môžeme aplikovať aj na vyššie hierarchické úrovne, vrátane úrovne ekosystému:

1) **Sebazoskupovanie** (*self-assembly*) znamená spontánne zhlukovanie alebo zmenu relatívneho umiestnenia prvkov (napr. buniek v tkanive, topológie druhov a ich ník v ekosystéme), ktoré umožňuje ich vzájomné prepojenie v priestore a čase, nevyhnutné pre vznik zložitých štruktúr.
2) **Sebavzorkovanie** (*self-patterning*) znamená spontánny vývoj štruktúr a obrazcov riadením zmien stavov prvkov v čase a priestore (napr. vývoj orgánov rastliny alebo vývoj rôznych druhov a ich skupín (gíld) vplyvom dostupnosti potravných zdrojov a súčasne tlaku rôznych predátorov).
3) **Seboupoháňaná morfogenéza** (*self-driven morphogenesis*) spočíva v tom, že vnútorné autoorganizačné mechanizmy vytvárajú zložité priestorové štruktúry s vlastnou dynamikou (napr. špecializované tkanivá a orgány v organizme alebo populácie rôznych druhov v ekosystéme).

Účelom autoorganizácie je rozvíjať zložitosť fyzickej štruktúry a vnútorného usporiadania živých systémov, od ktorého závisí ich prežitie, vývoj, reprodukcia aj obnova po narušení a poškodení. Autoorganizácia umožňuje integráciu jednoduchších systémov do zložitejších systémov vyšších hierarchií. Napr. ekosystém vzniká spontánnymi interakciami populácií druhov, ktoré sa tým integrujú a súčasne evolučne vyvíjajú, čo vedie k zmenám ich vlastností a správania, ale čoho výsledkom je **zložitý adaptívny systém**, ktorého evolúcia ako celku sa takto vynára cestou „zdola nahor", prostredníctvom evolúcie druhov (LEVIN 2005). Na každej z úrovni týchto hierarchií je možné pozorovať nové vlastnosti, ktoré nie sú známe z predošlých úrovní a ktoré sa nazývajú **emergentné vlastnosti** (ODUM 1977).

Koncepcia autoorganizácie je vo vedeckej komunite široko akceptovaná, hoci mechanizmy, ktoré ju zabezpečujú, však zatiaľ nie sú uspokojivo objasnené. Spolu s autoreguláciou, ktorá udržiava vnútornú rovnováhu systému na báze záporných spätných väzieb, ide o kritické jednotiace princípy vývoja všetkých prírodných systémov. Idea spontánnej samoorganizácie prvkov do zložitejších systémov má zatiaľ viacero interpretácií, ktoré sa zhodnú v tom, že jej **základom sú interakcie prvkov systému**. Napr. konvenčný evolučný princíp hovorí o náhodných mutáciách a z nich vyplývajúcich interakciách typu pokus – omyl, ktorých výsledkom je nový, zložitejší systém. CAPRA (1997) autoorganizáciu vysvetľuje

existenciou určitej mentálnej poznávacej aktivity, ktorá je podľa neho prítomná v každom organizme, od améby až po človeka (aj keď ich mentálne kapacity sú samozrejme kvalitatívne veľmi rozdielne).

Autoregulácia: spontánne udržiavanie dosiahnutého usporiadania systému

Polárnym princípom k vývoju a rozvoju zložitého živého systému je udržanie jeho dosiahnutého usporiadania. Preto na opačnom póle k autoorganizácii musela evolúcia vytvoriť aj procesy autoregulácie. Zložitú fyzickú štruktúru a správanie autoorganizáciou vytvoreného živého systému udržiavajú **autoregulačné (alebo samoregulačné, samousmerňujúce) procesy**, ktoré umožňujú detekovať zmeny vonkajšieho prostredia a aj napriek týmto zmenám udržiavať podstatné charakteristiky systému (ELIÁŠ 2007). Základom autoregulácie je už vyššie vysvetlený princíp zápornej spätnej väzby.

Tento dôležitý komplementárny mechanizmus k autoorganizácii každého biologického aj ekologického systému je základom jeho vnútornej rovnováhy – homeostázy. **Homeostáza** (z gréckeho *„homoios“* – rovnaký a *„stasis“* – trvanie) znamená udržiavanie relatívne konštatných podmienok vnútorného prostredia biologického alebo ekologického (ale tiež sociálneho alebo socioekonomického) systému aj napriek zmenám podmienok vonkajšieho prostredia (napr. udržiavanie konštatnej telesnej teploty homoiotermných živočíchov). Homeostáza je teda nevyhnutnou podmienkou udržania zložitej fyzickej štruktúry, emergentných vlastností a zložitých vzorov správania sa daného systému. Mechanizmy homeostázy fungujú na báze záporných spätných väzieb a **vyrovnávajú oscilácie** systému spôsobené zmenou podmienok prostredia, t.j. narušeniami zvonku a tým udržiavajú podstatné charakteristiky štruktúry a vzťahov v systéme. **Podstatou mechanizmu homeostázy** je autoregulácia kritických premenných na báze spätných väzieb za účelom udržiavania ekologickej rovnováhy systému (ODUM 1977).

Autoorganizačné a autoregulačné procesy sa vzájomne dopĺňajú, ich vzájomne komplementárne pôsobenie je základom vývoja aj pretrvávavnia života. Autoregulačné mechanizmy sa zväčša v priebehu evolúcie živých systémov, ale aj v priebehu rastu a dospievania organizmov alebo sukcesie ekosystémov stávajú efektívnejšími, čo pravdepodobne súvisí s rastom ich zložitosti a tým aj zložitosti ich spätnoväzobných okruhov. Príkladom je aj rozdielna schopnosť regulácie telesnej teploty rôznymi skupinami organizmov.

Príklad autoregulácie telesnej teploty živočíchov

Poikilotermné živočíchy ako obojživelníky, plazy, hmyz a iné bezstavovce sa vyznačujú vysokou teplotnou vodivosťou medzi ich telom a prostredím, preto ľahko získavajú teplotu z prostredia, ale ľahko ju aj strácajú. Ich telesná teplota sa pomerne rýchlo mení v závislosti od teploty ich vonkajšieho prostredia. Aby sa s tým vyrovnali, tieto živočíchy svoje fyziologické a rastové procesy regulujú zmenou rýchlosti enzymatických procesov (v závislosti od teploty tela sa uplatňujú rôzne enzymatické systémy) a aktívne sú iba v určitom limitovanom rozsahu teplôt (ACT – *active temperature range*). Na zmeny teplôt sa adaptovali predovšetkým svojim správaním. Naviac, aj ich životný cyklus býva výrazne kratší ako životný cyklus tých homeotermných živočíchov, ktoré obsadzujú podobné niky v ekosystéme.

Homeotermné živočíchy, vtáky a cicavce, udržiavajú svoje teplotné optimum oxidáciou glukózy a ďalších energeticky bohatých molekúl. S gradientom teploty medzi povrchom ich tela a teplotou vonkajšieho prostredia sa vyrovnávajú napr. sezónnymi zmenami izolácie na povrchu tela, (typ a hrúbka kožušiny, štruktúra peria, hrúbka vrstvy tuku), zmenami veľkosti produkcie tepla v závislosti od metabolizmu alebo zbavovaním sa nadbytočného tepla prostredníctvom potenia sa a vyparovania potu. Cenou za výrazne vyššiu nezávislosť od teplotných zmien vonkajšieho prostredia je u nich však podstatne vyššia spotreba energie (oproti poikilotermným živočíchom). Avšak stabilnejšie vnútorné prostredie a dostatok energie súčasne umožňuje vývoj zložitejších systémov, vrátane zložitejšieho mozgu.

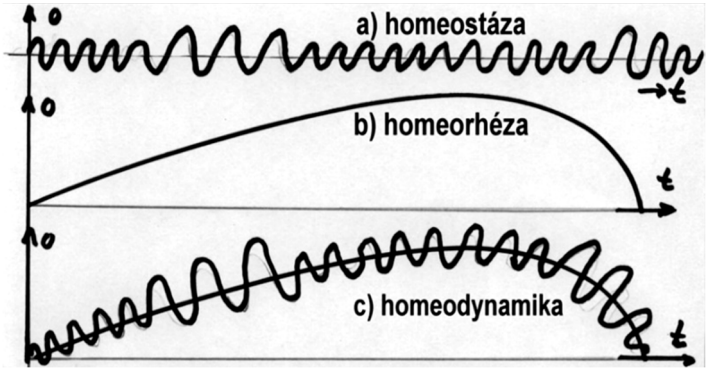
Upravené podľa: SMITH 1996

Od homeostázy k homeodynamike

Mechanizmy homeostázy **vyrovnávajú oscilácie** systému a udržiavajú podstatné charakteristiky jeho

štruktúry a procesov aj pri narušeniach zvonku. Ak však oscilácie presiahnu prah, po ktorý sú schopné ich tlmiť autoregulačné mechanizmy, môže prísť k náhlemu prechodu systému do iného usporiadania, príp. k jeho kolapsu. V skutočnosti sa všetky živé systémy menia v čase: organizmy aj ekosystémy sledujú svoje životné dráhy, ktoré závisia od genetickej informácie, histórie vývoja a vplyvov prostredia, preto je životná dráha každého z nich jedinečná (ROSE 1998). Vývoj organizmu alebo ekosystému v smere jeho prirodzenej vývojovej (životnej) dráhy, resp. jeho tendencia sa v tejto dráhe pohybovať, sa nazýva **homeorhéza** (z gréc. „*homeo*" – rovnaký a „*rhesis*" – tok, JURKO 1990).

Homeostázu a homeorhézu spája koncepcia **homeodynamiky** (ROSE 1998). Môžeme si ju predstaviť ako prestavovanie homeostatických mechanizmov organizmu alebo ekologického systému na trajektórii jeho životnej dráhy. Podobne ako pri homeostáze, autoregulačné mechanizmy udržiavajú relatívne konštantné vnútorné prostredie a funkčnosť systému aj v prípade, ak sa podmienky okolia, vonkajšieho prostredia systému zmenia. Rozdiel je v tom, že vnútorné konštanty, ku ktorých udržaniu smerujú autoregulačné mechanizmy sa počas životnej dráhy menia (obr. 5.7.). To znamená, že optimálne hodnoty premenných, ktoré definujú stav systému (napr. toky látok cez membránu bunky alebo telesná teplota organizmu), nie sú po celý život konštantné, ale menia sa v určitom rozmedzí, vykazujú isté oscilácie v závislosti od polohy na jeho vývojovej trajektórii.



Obr. 5.7. Zjednodušený pohľad na homeostázu, homeorhézu a homeodynamiku.
Schéma: © Peter Sabo, *námet podľa:* ROSE 1998.

Príklady homeodynamiky

Koncepcia homeodynamiky prináša nové **vhľady do správania zložitých systémov**, či už ide o rast organizmov a biologickú evolúciu alebo sukcesiu spoločenstiev. Napr. v prípade evolúcie nespochybňuje význam génov pre formovanie životnej dráhy organizmu, avšak rozširuje výklad v tom zmysle, že **gény nedeterminujú budúcnosť živého systému absolútne** (ako tvrdí napr. Dawkinsova koncepcia sebeckých génov), ale predstavujú základný potenciál jeho vývoja v priebehu životnej dráhy (ROSE 2008). Skutočná realizácia tejto dráhy závisí aj od histórie vývoja systému (predovšetkým od počiatočných podmienok), ako aj od prostredia, s ktorým je príslušný organizmus v neustálej interakcii – od abiotických faktorov, biotických interakcií, disturbancií a vplyvov človeka. Významnú rolu pritom hrajú už spomínané zložité biochemické interpretačné mechanizmy génov (kapitola 3).

Homeodynamiku môžeme ilustrovať aj na príklade sukcesie, ktorá predpokladá preferenciu určitých cieľových postupností kvázi rovnovážnych stavov ekosystému, tzv. klimaxového atraktora. **Vývojových trajektórií môže byť vždy viac,** závisia od typu ekosystému, počiatočných podmienok a prírodných disturbancií, z ktorých mnohé výrazne mení antropický tlak (napr. acidifikácia, kultúrna eutrofizácia, intoxikácia a pod.), podstatné je, že smerujú k systému, ktorý umožňuje najefektívnejšie využitie dostupnej energie.

Je napr. známe, že ani klimaxové štádium nie je trváce a nemenné, v skutočnosti predstavuje iba jeden z kvázi rovnovážnych stavov vývojového cyklu ekosystému . Môžeme zhrnúť, že homeodynamika umožňuje udržiavanie funkcií potrebných pre život bunky, organizmu alebo ekosystému, nielen napriek neustálym zmenám ich prostredia, ale aj napriek ich rôznej polohe v rámci ich vývojovej trajektórie.

5.2.3 Polarita, ekologická rovnováha a symetria v prírode

Polarita vyjadruje vzťah medzi dvomi protichodnými hodnotami určitej veličiny alebo medzi dvomi protichodnými vlastnosťami, procesmi alebo princípmi. Je základom symetrie, dynamickej rovnováhy a harmónie v prírode. Známa je polarita fyzických vlastností prvkov aj systémov, napr. kladný a záporný elektrický náboj, severný a južný magnetický pól, svetlo a tma, teplo a chlad, sucho a vlhko

a pod., polarita chemických iónových väzieb (spočíva v priťahovaní sa iónov s opačným nábojom).

Navyše, **nejde iba o polaritu objektov a vlastností, ale tiež o polaritu procesov**, napr. expanzia a kontrakcia (napr. nádych vz. výdych, rozpínanie lesa na úkor kosných lúk a pasienkov po zanechaní ich obhospodarovania vz. ústup lesa v dôsledku aktivít človeka, alebo vývoj cyklón a anticyklón). K príkladom polarity emergentných vlastností ekosystému patrí napr. jeho dynamika vs. stabilita, odolnosť vs. pružnosť, elasticita (t.j. ekologická rezistenica vs. ekologická reziliencia) a mnohé iné.

Polaritu nájdeme aj medzi živými bunkami, ktoré sa odlišujú svojím tvarom, štruktúrou, procesmi a funkciami – koncepcia polarity patrí nielen k základným princípom diferenciácie buniek v trojrozmernej štruktúre organizmu, ale tiež prispieva k mechanizmom, ktoré zabezpečujú jeho integritu a koordináciu jeho funkcií (MEDVEDEV 2012). Polaritu nájdeme aj medzi organizmami (najznámejšia je polarita pohlaví toho istého druhu potrebná pre sexuálnu reprodukciu). Polaritu vyjadruje aj postavenie druhu v trofickom reťazci (napr. primárne producenty vz. vrcholové predátory), postavenie ekosystému vo vzťahu k živinám (napr. oligotrofné vz. eutrofné ekosystémy) a pod.

Ekologická rovnováha vz. dynamika ekosystému ako hra polarít

Iným typom polarity je **vzájomne protichodné pôsobenie procesov a princípov v prírode**, napr. rast vz. rozklad organizmu, chaos vz. usporiadanie, autoorganizácia vz. autoregulácia, homeostáza vz. homeorhéza, biologická rozmanitosť vz. jednota života, ekologická rovnováha vs. dynamika ekosystémov. (Polárne princípy sú zjavné aj v ľudskej spoločnosti, napr. sloboda a otroctvo, pravda a lož, dobro a zlo, egoizmus a obetavosť, emocionálnosť a racionalita.) K známemu odkazu čínskej tradície patrí predstava harmónie vesmíru, krajiny a spoločnosti ako výsledku vzájomného pôsobenia dvoch protikladných princípov jin a jang a neustále obnovovanej dynamickej rovnováhy medzi nimi.

Úchvatnú hru polarít, ktoré sa skrývajú za prírodnými dejmi, vnímal aj slávny Johann Wolfgang Goethe (1749 – 1832): *„Príroda! Sme ňou obklopení a obopnutí: bezmocní z nej uniknúť a bezmocní za ňu preniknúť... Večne tvorí nové tvary; čo tu je, tu ešte nebolo, čo bolo, nevráti sa späť. Všetko je nové a predsa vždy staré... z najuniformnejšieho materiálu vytvára najväčšie protiklady; bez najmenšej námahy dospieva k dokonalosti, najexaktnejšej určitosti, hoci vždy jemne zahalenej.“* (GOETHE 1982)

Polarita vlastností, procesov a princípov je v prírode aj v spoločnosti vždy **zdrojom určitého napätia medzi dvoma pólmi,** ktoré spúšťa dynamiku protikladne pôsobiacich procesov. Tieto protikladné procesy sa zjednocujú na hierarchicky vyššej úrovni systému. V prípade fyzickej štruktúry sem patria napr. chemické väzby medzi atómami, väzby medzi organelami v bunke, spojenia buniek s rôznymi funkciami v pletive rastliny a v tkanive živočícha, interakcie druhov s rôznym postavením (nikou) v ekosystéme.

S polaritou úzko súvisí pojem rovnováhy. **Protichodné sily a princípy pôsobia síce protikladne, ale práve preto sú vzájomne komplementárne,** a to v každom živom aj neživom systéme vesmíru, od elementárnych častíc až po Zemský systém, kde sa vzájomne dynamicky vyvažujú. Príkladom je dynamické vyváženie konkurencie a kooperácie jedincov vo vlčej svorke, ktoré vedie k určeniu sociálneho statusu jedinca a k vymedzeniu jeho vzťahov voči ostatným. V prípade ekologických procesov princípu polarít podlieha napr. striedanie fáz rastu a konzervácie biomasy s fázou rozpadu, spojenom s odumieraním veľkej časti fytomasy a tým uvoľnením v nej viazanej energie, čo nás núti oceniť aj úlohu prírodných disturbancií, napr. požiaru, veterného polomu, ako základu udržania integrity ekosystému.

Analogicky prídeme k tomu, že k evolučným adaptáciám organizmov je komplementárne pôsobenie organizmov na prostredie, ktoré ho mení a tým zlepšuje podmienky pre život samotných organizmov. Podobne vzájomná konkurencia prvkov živého systému je vyvážená **procesmi vzájomnej kooperácie,** ktoré v prírode nájdeme od úrovne symbiózy organel v bunke až po synergiu život udržiavajúcich systémov Zeme. Napríklad protipólom medzidruhovej konkurencie je **mutualizmus,** vzájomne prospešný vzťah medzi aspoň dvoma druhmi organizmov, ktoré sú vo vzájomnom fyzickom kontakte a prešli úzkym spoločným koevolučným vývojom (napr. vzťah medzi kvitnúcimi rastlinami a ich opeľovačmi).

Z princípu hry polarít vychádza aj pojem dynamickej **ekologickej rovnováhy** ako dynamicky vyváženého a pre celok prospešného vzájomného pôsobenia jednotlivých prvkov ekosystému, ktoré z neho vytvára integrovaný a funkčný celok. V strednej Európe je viac zaužívaný pojem **ekologickej stability**, ako schopnosť ekosystému alebo krajiny vyrovnávať pôsobenie vplyvov a zmien jeho okolia a napriek vonkajším tlakom si zachovávať svoju prirodzenú štruktúru (vrátane prirodzeného druhového zloženia resp. prirodzenej kompozície biotopov), charakteristické vlastnosti a funkcie (MÍCHAL 1994). V krajine je nepriaznivé pôsobenie ekologicky labilných komponentov ako sú napr. zastavané plochy, cesty alebo oráčiny vyrovnávané pôsobením ekologicky stabilnejších komponentov, ako sú napr. lesné enklávy, brehové porasty, remízky, druhovo pestré travinnobylinné porasty, mokrade – preto sa nazývajú **ekostabilizačné prvky.**

Súmernosť (symetria) a nesúmernosť (asymetria)

Súmernosť (symetria) v prírode (z gréc. *„symmetria"* – zhoda v rozmeroch, proporčnosť) najčastejšie vyjadruje **zhodu, rovnomernosť, pravidelnosť alebo proporčnosť tvarov objektov alebo priebehu procesov v prírodnom systéme.** Keďže ľudská myseľ oceňuje pravidelne sa opakujúce vzorce v prírode, symetria je dôležitou podmienkou vnímania a pociťovania harmónie v neživej a najmä v živej prírode (FEYNMAN 1965). Najznámejšou zmyslovou skúsenosťou je **geometrická súmernosť**, ktorú vidíme napr. v kryštáloch minerálov, snehovej vločke, listoch, kvetoch a plodoch rastlín, v habituse stromov a v telách živočíchov – napr. symetria ľavých a pravých krídel motýľa, vážky, včely, vtáka. Tento typ súmernosti charakterizuje proporčne vyvážené rozdelenie opakujúcich sa častí tiel, ako sú napr. končatiny a krídla, a to nielen ich tvarmi a veľkosťou, ale často i sfarbením (napr. symetricky rozmiestnené farebné škvrny a oká na krídlach motýľa).

Základné typy geometrickej súmernosti organizmov

Bilaterálna súmernosť: mnohé organizmy majú iba jednu osu súmernosti , to znamená, že majú ľavú a pravú časť rovnako veľkú a zrkadlovo rovnakého tvaru.

Pravidelná súmernosť: telom organizmu alebo jeho časti (napr. kvetom určitých druhov kvitnúcich rastlín) môžeme preložiť viac osí súmernosti.

Sférická súmernosť: telom organizmu (napr. váľača gúľavého) alebo určitými druhmi plodov rastlín je možné preložiť prakticky ľubovoľný počet rovín súmernosti.

Symetria krídel vtákov a lietajúceho hmyzu nie je len o kráse, ale je tiež **základným predpokladom toho, aby mohli lietať**, podobne symetria tiel početných iných druhov živočíchov je tiež dôležitá pre ich pohyb (MOUBAYIDIN & ØSTERGAARD 2014). V prípade rastlín je zaujímavá hypotéza, že bilaterálna súmernosť kvetov, napr. v prípade orchideí umožňuje opeľovačom účinnejší zber peľu a jeho prenesenie na kvet inej rastliny ako je tomu v prípade rastlín s pravidelne súmernými kvetmi, napr. zvončekmi. Tento účinnejší prenos peľu súčasne zvyšuje pravdepodobnosť reprodukčnej izolácie a speciácie týchto rastlín (SUDGEN 2004).

Za symetriu sú zodpovedné konkrétne gény, pričom evolúcia zygomorfie kvetov krytosemenných rastlín sa považuje za kľúčovú inováciu, ktorá je podľa niektorých vedcov dôsledkom ich koevolúcie s opeľovačmi, ktorá viedla k špecializácii rastlín na určité opeľovače z triedy hmyzu (ZHANG et al. 2010). Z princípu polarity tiež vyplýva, že k súmernosti v živej prírode musí existovať aj **nesúmernosť (asymetria)**, asymetrické sú napr. rastliny so striedavými listami, v krajine napr. väčšina horských hrebeňov. Tiež väčšina vnútorných orgánov v tele živočíchov je asymetrických (výnimkou sú napr. naše obličky a pľúca).

Symetria má viac významov. Napr. vo fyzike znamená odolnosť, **invariantnosť systému** voči jeho rôznym transformáciám, pričom sa tu nechápe iba geometricky. Napr. univerzálne prírodné zákony (ako sú aj v kapitole 4 priblížené prvý a druhý termodynamický zákon) sa považujú za symetrické v priestore a čase, čo znamená, že tieto zákony sa v rámci nášho 4-rozmerného časopriestoru nemenia.

V ekosystéme by sme mohli **symetriu vnímať ako rovnováhu** medzi procesmi vzniku a vývoja vs. rozpadu a zániku jeho fyzických štruktúr, pričom tieto štruktúry zahŕňajú živé organizmy, abiotické zložky prostredia, ale aj vzťahy medzi nimi. Podobne v ekológii hovoríme napr. o **symetrickej konkurencii** vtedy,

ak ide o vzájomne proporčnú konzumáciu limitovaných prírodných zdrojov jednotlivými organizmami, ktorá zhruba rovnako znižuje ich dostupnosť pre ďalšie jedince alebo rôzne druhy. Naopak, o **asymetrickej konkurencii** hovoríme v prípade, ak konkurujúce si organizmy využívajú dostupné zdroje asymetricky (napr. rastliny súťažiace o svetlo, vodu, živiny), čo znamená, že pri dostatku zdrojov sú jedince niektorých druhov schopné rásť veľmi rýchlo a dosahovať značnú veľkosť, pretože spotrebúvajú neproporčne veľké množstvá dostupných zdrojov, sú teda zvýhodnené. To vedie k tomu, že niektorý druh bude následným znižovaním dostupnosti zdrojov (napr. svetla) viac postihnutý, teda znevýhodnený. V prípade druhovej konkurencie to môže viesť až ku **konkurenčnému vylúčeniu** menej úspešného druhu zo spoločenstva.

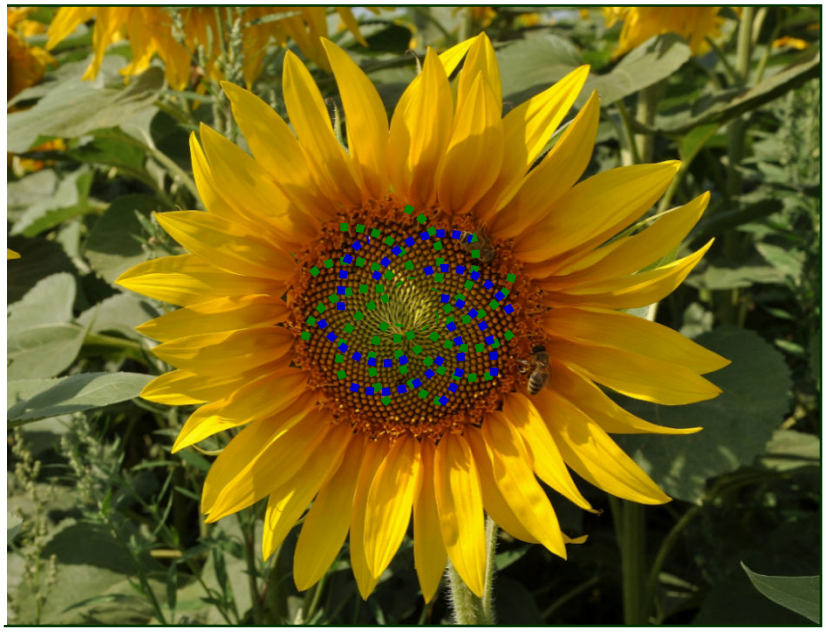
Práve mechanizmus asymetrickej konkurencie môže viesť k poklesu druhovej diverzity spoločenstva (DEMALACH et al. 2016). V praxi to môžeme sledovať napr. pri opúšťaní krajiny a zmene obhospodarovania druhovo pestrých lúk a pasienkov. V dôsledku absencie kosenia a pastvy tlak dominantných druhov vedie ku konkurenčnému vylúčenie konkurenčne slabších druhov. Naopak, koexistenciu viacerých druhov na lúke udržiavajú jej malé až stredné narušenia (kosba a pastva), ktoré potláčajú dominantné druhy.

Zaujímavé sú tiež úvahy, že tak symetria, ako aj určité špecifické druhy asymetrie (napr. zlatý rez v architektúre) **súvisia s naším vnímaním krásy** prírody, architektúry aj umenia. Napriek tomu, že štúdium krásy patrí k umeleckým a nie k vedeckým disciplínam, jej vnímanie by malo byť aj pre vedca dôležité. Napr. v prípade krajiny platí, že ak je kultúrna krajina ekologicky vyvážená, súčasne je zväčša aj krásna, ľudskému oku príťažlivá, harmonická. To znamená, že aj vedcom stojí zato usilovať sa aj o krásu krajiny.

Matematika v organizácii kvetov, plodov rastlín, organizmov a galaxií

Súmerné sú často aj zložené kvety rastlín (súkvetia), ktorých vnútorné kvety a plody bývajú špirálovite usporiadané, napr. v prípade slnečnice (obr. 5.8), šišiek ihličnatých drevín, často uvádzaným príkladom sú aj plody karfiolu a ananásu, a podobne sú v smere aj proti smeru hodinových ručičiek špirálovite stočené a v určitom pomere sa analogickým spôsobom rozvíjajú aj schránky ulitníkov.

Vo všetkých uvedených prípadoch rast uvedených orgánov alebo organizmov možno vyjadriť pomocou tzv. **Fibonacciho čísel** (SINHA 2017). Ide o postupnosť čísel, v ktorom je nasledujúce číslo vždy súčtom dvoch predchádzajúcich, t.j. 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144. Podobný princíp môžeme do určitej miery pozorovať aj pri počtoch okvetných lístkov kvitnúcich rastlín (ale tu neplatí tak preukazne ako v predošlom prípade). Napr. ľalie (*Lilium* sp.) majú po tri vonkajšie a tri vnútorné okvetné lístky (aj tyčinky sú tri a tri), iskerníky ich majú po päť, čakanka 21 a sedmokráska neraz 34 alebo 55 lístkov. Fibonaccciho čísla však nie sú obmedzené iba na úroveň organizmov, ale nájdeme ich aj medzi najväčšími objektami vo vesmíre, napr. aj v tom, ako sa rozvíjajú špirály galaxií.



Obr. 5.8. Špirálovité usporiadanie rúrkovitých kvetov a semien slnečnice ročnej (*Helianthus annuus*) vsúkvetí (v úbore). Podiel počtu ľavotočivých špirál (tu 55 – zelená prerušovaná čiara) a pravotočivých (tu 34 – modrá prerušovaná čiara) tejto slnečnice dáva číslo 1,617647, čo je blízko k číslu 1,618034, ktoré v architektúre označuje zlatý rez resp. zlatý podiel. V prípade slnečnice vyjadruje optimálne využitie priestoru, svetla a živín postupne dozrievajúcimi semenami. „Zlatý uhol" špirál je zhruba 137,5° a ich tvorbu riadi hormón auxín.
Foto: © Peter Sabo, 2018

5.3 Siete a hierarchie živých systémov, emergentné vlastnosti

V predošlej časti sme priblížili základné mechanizmy usporiadania živých systémov ako sú interakcie a procesy, cykly a spätné väzby. Prostredníctvom ich kombinácií vznikajú zložitejšie vzorce usporiadania systému ako sú siete, hierarchie, symetrické a asymetrické štruktúry a pod., na ktorých sa môžu efektívne realizovať toky a transformácie energie, hmoty aj informácií. Tieto toky integrujú prvky do funkčného celku, pri súčasnom udržiavaní podmienok pre existenciu jednotlivých prvkov systému – napr. buniek v tkanive a v pletive, organizmov v ekosystéme, ekosystémov v krajine a pod.

Sieť ako základ štruktúry živého systému

Napriek rastúcemu počtu štúdií o biologickej a ekologickej zložitosti zatiaľ neexistuje jej všeobecne akceptovaná definícia, zhoda je skôr v tom, čo je zdrojom tejto zložitosti a ako sa táto zložitosť prejavuje (YATES 1994). Základom každého živého systému je sieťové a hierarchické usporiadanie a vznik nových, tzv. emergentných vlastností na každej úrovni hierarchie. **Koncepcia siete ako vhodnej grafickej reprezentácie architektonickej štruktúry živého systému** (CAPRA 1997) zahŕňa 1) jednotlivé entity (prvky) systému, ktoré predstavujú uzly siete a 2) väzby medzi nimi, ktoré predstavujú spojenia medzi uzlami. Zreťazenia jednotlivých interakcií medzi rôznymi prvkami siete vytvárajú procesy, ktoré dané prvky integrujú do koherentného a funkčného celku, systému. Z tejto architektonickej štruktúry vyplýva aj jej efektívne matematické zobrazenie na báze teórie grafov (napr. BUNN et al. 2000).

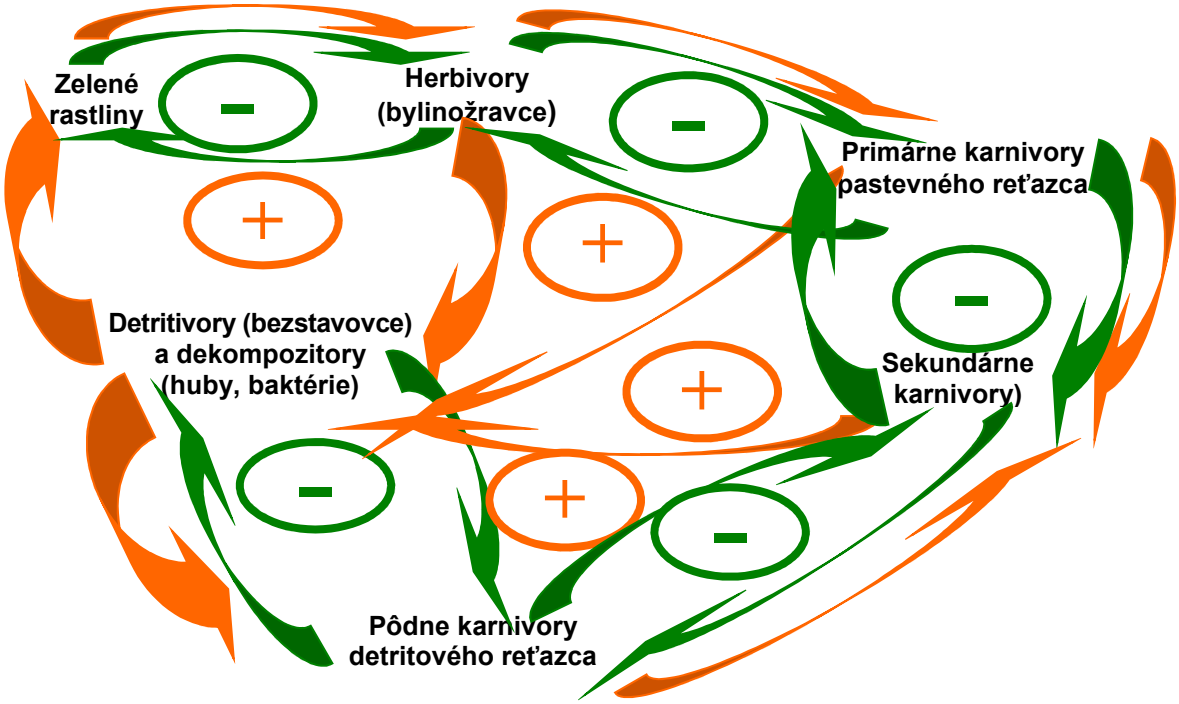
Jednotlivé prvky takejto siete sú vzájomne prepojené, komunikujú medzi sebou a ovplyvňujú sa, t.j. sú vzájomne závislé (JØRGENSEN et al. 2007). Napr. v lesnom ekosystéme sú základnými prvkami tejto štruktúry stromy, ďalšie rastliny, huby, živočíchy a mikroroganizmy. Abiotický rámec tejto siete vytvára pôda, geologický substrát, reliéf, klíma a vodstvo. Rozmanité interakcie (pôsobiace zdola, z úrovne prvkov systému), ako aj mechanizmy spätných väzieb (pôsobiace zhora, z úrovne sieťových štruktúr), zabezpečujú funkčnosť systému ako koherentného celku, ktorý charakterizuje synchronizácia životných dráh, rytmov a cyklov jeho jednotlivých organizmov.

Autopoietické siete prvkov nižších hierarchických úrovní sa vnárajú do systémov vyšších hierarchií. **Príkladmi sú** siete organel v bunke, potravné (trofické) siete v ekosystéme, v ktorých prebiehajú toky a transformácie energie, látok a informácie alebo neurónové siete v mozgu, v ktorých biochemické procesy a synapsie prepájajú neuróny do funkčných skupín. Podobne môžeme odlíšiť napr. metapopulačné siete zabezpečujúce výmenu genetických informácií medzi jednotlivými miestnymi populáciami.

5.3.1 Niektoré typy ekologických sietí, nelinearita a autopoiéza

Pojem **ekologická sieť** sa v ekológii a v krajinnej ekológii používa vo viacerých významoch. Prvým z nich je potravná (trofická) sieť ekosystému, ktorá vyjadruje potravné (trofické) vzťahy medzi autotrofnými organizmami a konzumentami rôznych rádov, od herbivorov až po vrcholové predátory, vytvárajúc typický zložitý ekologický ekosystém (POISOT et al. 2015). Na obr. 5.9. je pomerne netradičná schéma trofickej siete ekosystému, ktorá vznikla zosieťovaním spätných väzieb medzi potravnými gildami druhov rôznych trofických úrovní a rôznych trofických reťazcov. (Gilda je skupina jedincov viacerých druhov organizmov s rovnakým funkčným alebo priestorovým postavením v ekosystéme, využívajúcich tiež rovnaké zdroje, napr. potravné – bezstavovce troficky viazané na dub a pod.)

Druhým významom pojmu je **interakčná sieť,** ktorá je rozšírením trofickej siete. Jej uzly predstavujú jednotlivé organizmy. Ich vertikálne spojenia vyjadrujú trofické vzťahy medzi organizmami susedných trofických úrovní a horizontálne spojenia vyjadrujú konkurenčné alebo mutualistické vzťahy v rámci jednotlivých úrovní (CAIN et al. 2014). Početnosť spojení daného druhu s ďalšími druhmi závisí od jeho charakteristík (napr. generalisti sa vyznačujú veľkým počtom spojení, kým u špecialistov je tomu naopak). Súvisí to aj s hojnosťou, abundanciou príslušného druhu v spoločenstve: čím je populácia daného druhu väčšia, tým budú početnejšie a výraznejšie aj jeho interakcie s ďalšími druhmi spoločenstva.



Obr. 5.9. Príklady cyklického zreťazenia kladných a záporných spätných väzieb ekosystému na báze spojenia pastevných a detritových trofických reťazcov v hypercykle**.** Kladné spätnoväzobné okruhy sú vyznačené oranžovou farbou, záporné zelenou. Napriek tomu, že každý model je zjednodušením reality, pomerne dobre tu ilustruje sieťové usporiadanie, ktoré je podľa viacerých autorov základom života. *Schéma:* © Peter Sabo, 2012.

Tretím významom je **horizontálna ekologická sieť v krajine**, ktorej uzly predstavujú ekologicky významné krajinné prvky, označované ako jadrové územia alebo biocentrá, pričom prepojenia medzi nimi predstavujú ekologické koridory resp. biokoridory, ktorými sa šíria a migrujú organizmy medzi biotopmi, ktoré by bez týchto koridorov ostali izolované (SABO et al. 2011b). Konkrétna štruktúra ekologickej siete ovplyvňuje jej zraniteľnosť voči vonkajším narušeniam resp. ich pretrvávanie, čo má významné dôsledky pre dynamiku a ochranu biodiverzity (SOLÉ & MONTOYA 2001).

Medzi procesmi, ktoré sa realizujú v rámci jednotlivých sietí existuje silná vzájomná synergia. **Synergia** znamená súčinnosť, spolupôsobenie aspoň dvoch faktorov, ktoré je často silnejšie ako súčet individuálnych pôsobení (IVANIČKA 1997. V biológii môže vyjadrovať napr. schopnosť buniek fungovať vzájomne prospešne v mnohobunkovom organizme. V ekológii môže označovať aj negatívne spolupôsobenie viacerých faktorov, napr. zmeny klímy, odlesňovania, úbytku biodiverzity, znečisťovania, dezertifikácie a pod. Synergia iných procesov, však naopak, môže viesť k vzniku novej kvality. Napríklad v lese synergia prirodzenej dynamiky malých plôšok stromov vytvára rôznoveký les, čím zvyšuje jeho rezilienciu voči narušeniam (napr. víchriciam, hmyzu a pod.). Vznik novej kvality v dôsledku interakcií veľkého počtu prvkov a procesov, vedúci k novým emergentným vlastnostiam celku systému sa nazýva **synergéza.**

Sieťová architektúra umožňuje realizovať na fyzickej štruktúre systému autoorganizačné procesy rastu, dospievania a reprodukcie, ale aj evolúcie a na báze procesov autoregulácie dosiahnuté usporiadanie aj udržiavať (CAPRA 1997). V dôsledku synergie pôsobenia jej prvkov **sieťová organizácia prevažne zvyšuje odolnosť ekosystému** (rezistenciu) voči vonkajším vplyvom a jeho pružnosť (rezilienciu), to znamená schopnosť návratu do pôvodného stavu (resp. pôvodnej postupnosti stavov) po odoznení narušenia zvonku (JØRGENSEN 2012). Na druhej strane **táto architektúra umožňuje aj šírenie narušení** (napr. znečistenia v ekosystéme, inváznych druhov v krajine, šírenia požiarov a pod.).

Nelineárna dynamika a narušenie spätnoväzobných okruhov

Ak by sme kategórie druhov na trofických úrovniach v schéme na obr. 5.8. nahradili spektrom konkrétnych druhov, potom početné procesy budú prebiehať paralelne a ich synergia sa stane zdrojom

vysokej zložitosti systému. Zložito zosieťované okruhy spätných väzieb spôsobujú, že zmeny hodnôt premenných na výstupe systému zvyčajne nie sú úmerné zmenám hodnôt premenných na vstupe a **správanie takýchto systémov je vysoko dynamické, nelineárne** a ťažko predvídateľné. Preto zasahovanie do zložitých systémov môže viesť k naštartovaniu neočakávaným a nepriaznivých procesov.

Zložité prepájanie kladných a záporných spätných väzieb tiež znamená, že narušenie určitej väzby sa môže nepriaznivo prejaviť aj na funkčnosti iných spätnoväzobných okruhov. Príkladom je používanie pesticídov v poľnohospodárstve, ktoré okrem hospodárskych škodcov likviduje aj ich predátorov (napr. pavúky, dravý hmyz, pernaté dravce), čím **oslabuje až vyraďuje z činnosti ekostabilizačné okruhy záporných spätných väzieb**. Populačné gradácie poľnohospodárskych škodcov v takto oslabenom oráčinovom ekosystéme následne už nie sú utlmiteľné iba prirodzenými autoregulačnými mechanizmami, čo vyvoláva ekonomický tlak na ešte intenzívnejšie používanie agrochemikálií. Tie síce dokážu krátkodobo potlačiť populačné výbuchy škodcov, ale za cenu ďalšieho narúšania prirodzených biologických a ekologických autoregulačných mechanizmov.

Autopoiéza a autopoietická sieť

Pre pochopenie zložitosti a správania sa zložitých živých systémov sú významné aj ďalšie princípy, z nich najmä autopoiéza. Čílski biológovia a filozofi Huberto Maturana (∗1928) a Francisco Varela (1946 – 2001) vytvorili model ľudského mozgu ako **autopoietickej siete** a v nej spontánne prebiehajúce procesy nazvali **autopoiéza** (z gréc. „*auto*"- vlastný a „*poiesis*" – tvorenie, ROSE 1998). Autopoiéza označuje schopnosť systému spontánne vytvárať, udržiavať a reprodukovať sám seba. Obaja vedci organizáciu vysoko zložitého živého systému ľudského mozgu opísali ako množinu cyklických postupností interakcií medzi jeho prvkami, čím sa vytvára metabolická sieť, ktorej prvky sa vzájomne viac-menej kontinuálne ovplyvňujú. **Autopoietická sieť neustále pretvára a súčasne udržiava samú seba,** čím umožňuje spontánny rast, vývoj a udržiavanie (sebavytváranie), aj kontinuálnu spontánnu sebaobnovu (reprodukciu) živého systému. Túto koncepciu môžeme aplikovať aj na ekologické systémy.

Autopoietická sieť je **sieť prvkov a procesov**, v ktorej je úlohou každého prvku reagovať na aktivity jeho blízkych aj vzdialených susedov a interakciami s nimi sa zúčastňovať na tvorbe alebo transformácii iných prvkov siete (ROSE 1998). V interakčnej sieti ekosystému je to ovplyvňovanie veľkostí populácií druhov inými druhmi aj tvorba nových ník v priebehu sukcesie spoločenstiev a evolúcie ekosystémov. Takáto sieť je organizačne pomerne uzavretá, aj napriek tomu, že je otvorená tokom energie a látok (CAPRA 1997). Autopoietická sieť potvrdzuje, že jedným z kritérií živého systému je jeho schopnosť metabolizmu (BODEN 2000). Samotná sieť sa mení rekurzívne – oscilácie jej prvkov sa postupne zmenšujú, až sa dosiahne rovnovážny stav resp. cyklická postupnosť kvázi-rovnovážnych stavov (GÜNTHER & FOLKE 1993).

Autopoiéza prebieha v každom živom systéme. „*Kľúčovou vlastnosťou všetkého života je jeho schopnosť a nevyhnutnosť vytvárať, udržiavať a uchovávať seba samého v procese nazývanom autopoiéza*" (ROSE 1998). Napr. organely vytvárajú autopoietické siete v bunke, kým organizmy v ekosystéme. Sieťový princíp objasňuje aj vplyvy prostredia na epigenetické mechanizmy interpretácie génov. Výsledkom je jedinečnosť vývojových trajektórií organizmov, formovaných synergicky génmi, prostredím a ich vlastnou históriou. Organizačný priestor autopoietickej siete vymedzuje jej semipermabilná hranica, ktorá ju súčasne prostredníctvom tokov hmoty, energie a informácie prepája s okolím.

Aj funkčnosť a celistvosť ekosystému je výsledkom autopoietickej sieťovej organizácie všetkých transformačných a produkčných procesov, realizovaných na jednotlivých úrovniach trofických reťazcov a sietí. Napr. každej trofickej úrovni v ekosystéme zodpovedajú určité gildy – spoločenstvá druhov, ktoré využívajú približne rovnaké zdroje, zdieľajú podobné ekologické niky a vzájomne si konkurujú (PRIMACK et al. 2011). Primárni producenti transformujú anorganické živiny a energiu slnečného svetla do organických zlúčenín, tie využívajú a transformujú konzumenti, kým rozkladače menia mŕtvu organickú hmotu a vracajú minerály späť do obehu. Populácie jednotlivých druhov v trofických autopoietických sietiach sa takto podieľajú na udržiavaní, obnove a regulácii populácií iných druhov.

Ekosystém by prestal existovať v momente kedy by sa procesy v jeho autopoietickej sieti zastavili, a to aj napriek tomu, že jednotlivé organizmy v autopoietickej sieti nesledujú „spoločný záujem“ (NARUSE & IBA 2008). Koncepcia autopoietickej siete vedie k novému pohľadu na populácie a druhy. Kým redukcionistický prístup kladie dôraz na definíciu druhu podľa jeho morfológie, fyziológie, reprodukcie a dnes najmä genetického kódu, **systémový prístup rozširuje túto definíciu aj na interakcie druhu v jeho prostredí**, ktoré determinujú jedinečné charakteristiky druhu (napr. obrana akácií pred herbivormi tŕňmi alebo produkciou toxického tanínu, ochranné sfarbenie koristi alebo jej schopnosť rýchleho úniku pred predátormi, atď.). Práve životné prostredie druhu vytvára kontext, v ktorom sa tento evolučne vyvíjal a vyvíja, pričom toto prostredie podlieha zmenám (FATH 2014).

Problém môže nastať, ak do tohto kontextu príde druh, ktorý sa evolučne vyvinul v inom území. Väčšina nepôvodných druhov sa po čase dokáže zapojiť do existujúcich autopoietických sietí ekosystémov, do ktorých prenikla (zdomácnejú, stanú sa naturalizovanými druhmi), ale menšia časť druhov tieto siete naruší tak, že sa stane inváznymi druhmi. Invázne druhy sú nepôvodné druhy, ktoré charakterizuje konkurenčné vytláčanie až vylúčenie pôvodných druhov z ekosystémov a šírenie na nové stanovištia.

Nástup inváznych rastlín ako narušenie prírodných autopoietických sietí

V ochranárskej biológii je nepôvodný druh definovaný ako druh alebo nižší taxón, ktorý bol úmyselne alebo neúmyselne zavlečený alebo vysadený mimo svoj prirodzený minulý alebo súčasný areál. Nepôvodné sú však aj ďalšie druhy spontánne sa šíriace vďaka človeku, napr. v dôsledku meniacej sa klímy. Systémový prístup hovorí, že charakteristika ľubovoľného druhu sa nevyčerpáva jeho opisom ako prírodného objektu (resp. množine objektov v jeho populáciách), ale že jej dôležitou súčasťou je aj opis jeho vzťahov, vnútrodruhových a medzidruhových interakcií, ako aj interakcií s jeho abiotickým prostredím.

Takto ponímaná charakteristika druhu osvetľuje aj základné princípy narušenia prirodzených autopoietických sietí ekosystémov inváznymi druhmi. Ide o také nepôvodné druhy, ktoré sú (najmä informačne) v rôznej miere nekompatibilné s pôvodnou interakčnou autopoietickou sieťou ekosystému, do ktorého prenikli v dôsledku neúmyselného zavlečenia alebo introdukcie človekom, alebo sa do územia spontánne rozšírili napr. v dôsledku klimatickej zmeny. Z ich nekompatibility vyplývajú nepriaznivé dôsledky.

O zavliekaní druhov mimo ich pôvodných areálov písal už Charles Darwin, inváziám sa venoval napr. aj známy anglický zoológ Charles Elton. Systematický výskum inváznych rastlín sa však datuje až od 90. rokov 20. storočia. Prvé nepôvodné druhy prenikali do Európy už od začiatku neolitickej revolúcie, najmä zo Stredomoria, Prednej a Strednej Ázie, po roku 1492 začal prílev amerických druhov, rozvoj námornej dopravy pridal nepôvodné rastliny z Afriky, ďalších častí Ázie a Austrálie.

Svetová databáza naturalizovaných nepôvodných druhov GloNAF (*Global Naturalized Alien Flora database*) zatiaľ obsahuje 13 939 taxónov (4 % svetovej flóry). Desať nejrozšírenejších druhov zdomácnelo na asi 1/3 zemského povrchu. Celosvetovo najhojnejším nepôvodným druhom je mlieč zelinný (*Sonchus oleraceus*). Podľa európskej databázy nepôvodných druhov DAISIE (*Delivering Alien Invasive Species Inventories for Europe*) sa v Európe eviduje 6 658 nepôvodných terestrických druhov rastlín (DAISIE 2019). Počty týchto druhov prudko rastú, až 37 % druhov bolo zavlečených mimo miest ich pôvodného výskytu za posledných 40 rokov. Najviac ich pochádza z Európay a mierneho klimatického pásma Ázie.

Podľa doby zavlečenia sa naše nepôvodné druhy členia na archeofyty, ktoré sa do Európe dostali pred objavením Ameriky (1492) a neofyty, ktoré sem prenikli neskôr. Väčšina archeofytov bola zavlečená pri rozvoji poľnohospodárstva v staroveku a v stredoveku a preferuje suchšie biotopy, kým neofyty uprednostňujú prevažne vlhšie miesta. Na Slovensku rastie 282 archeofytov, ktoré preferujú suchšie biotopy, a 634 neofytov. Zdomácnené (naturalizované) nepôvodné druhy sa stali súčasťou domácej flóry.

Inváznym druh rastliny je nepôvodný druh flóry, ktorého diaspóry sa často spontánne šíria na veľké vzdialenosti od materských populácií (k čomu prispieva najmä globálny obchod, doprava ľudí a zvierat, splanievanie zo záhrad) a nekontrolovane obsadzuje stále nové stanovištia. Spravidla v nich nemá prirodzených nepriateľov (čo súvisí s informačnou nekompatibilitou invázneho druhu a autopoietickej siete, do ktorej prenikol), preto má vysokú konkurenčnú schopnosť, čím vytláča z biotopov pôvodné druhy rastlín. Do invázneho štádia sa v priemere dostáva iba 5 až 20 % nepôvodných druhov.

Nástup inváznych rastlín ako narušenie prirodzených autopoietických sietí – pokračovanie

Obr. 5.10. a) Invázna rastlina zlatobyľ kanadská (*Solidago canadensis*) sa k nám dostala ako okrasná a medonosná rastlina v 19. storočí zo Severnej Ameriky. Rozširuje sa prostredníctvom veľkej produkcie klíčivých nažiek, ktoré, ktoré rozvieva vietor, ale tiež vegetatívne pomocou podzemkov, čo prispieva k jej masovému rozširovaniu najmä pozdĺž ciest, na polia a na ruderálne stanovištia. *Foto:* © Peter Sabo, 2020.

Obr. 5.10. b) Invázna rastlina pohánkovec japonský (*Fallopia japonica*), 1 – 2,5 m vysoká trváca bylina bola dovezená do Európy v 19. storočí z Východnej Ázie ako okrasná a medonosná rastlina. Šíri sa najmä pozdĺž vodných tokov, ciest a rumovísk, kde vytvára rozsiahle porasty krovitého vzhľadu. Rastliny sa na jar obnovujú z adventívnych púčikov na podzemkoch a na ich úlomkoch, ktoré unáša voda. *Foto:* © P. Sabo, 2018.

Proces biologickej invázie začína tým, že nepôvodný druh musí prekonať geografické a ekologické bariéry a následne jeho šírenie ovplyvňujú populačne-ekologické kritériá, vrátane spektra a dostupnosti biotopov, na ktoré je viazaný. Úspešnosť invázie môže súvisieť aj s ekologickými a genetickými zmenami druhu v novom prostredí. V súčasnosti biologické invázie ovplyvňuje aj postupujúca zmena klímy.

Ekológiu invázií vysvetľujú desiatky hypotéz, k najvýznamnejším patria tieto:

- Stanovištné filtrovanie – tie zavlečené druhy, ktoré sú už dopredu adaptované a tým lepšie pripravené na podmienky v novom území, budú pri invázii úspešnejšie.
- Vzostup a pád – inváznydruh, ktorý sa na začiatku invázie rýchlo rozšíri môže neskôr v dôsledku adaptácie pôvodných druhov na jeho prítomnosť ustúpiť alebo dokonca vymiznúť.
- Únik pred nepriateľmi – úspešnosť invázie podporuje absencia patogénov, predátorov alebo herbivorov, ktorí kontrolovali a obmedzovali populáciu druhu v areáli jeho pôvodného výskytu.
- Zvýšenie konkurenčnej schopnosti – v území, kde druh nemá prirodzených nepriateľov nemusí investovať energiu do obrany pred nepriateľmi a môže jej viac investovať do rastu a rozmnožovania.
- Kolísajúca dostupnosť zdrojov – inváznedruhy ľahšie prenikajú do biotopov s dostupnými voľnými zdrojmi, ako sú najmä voda, živiny a slnečné svetlo.
- Oslabené ekosystémy – inváziu uľahčuje nižšia odolnosť narušených ekosystémov, k čomu prispieva prítomnosť invázneho druhu, čím sa uľahčuje nástup ďalších inváznych druhov.
- Nové zbrane – ak má druh vlastnosť, ktorá v invadovanom spoločenstve chýba (napr. adaptácia lúčneho druhu na spásanie a kosbu) vďaka ktorej je v konkurenčnej výhode oproti pôvodným druhom.

Vlastnosti zvyšujúce úspešnosť inváznych rastlín zahŕňajú vyššiu účinnosť a rýchlosť fotosyntézy, mohutný a rýchly rast, vegetatívne rozrastanie, dlhú dobu kvitnutia, vysokú plodnosť, účinné šírenie, lepšie klíčenie a lepšie prežívanie semenáčikov aj rezistenciu voči herbivorii.

K šíreniu inváznych druhov prispievajú narušované biotopy (napr. rumoviská, opustené plochy, okraje ciest, železnice, brehy riek) a vysoký prísun živín (eutrofizácia). Napr. zlatobyľ kanadská (*Solidago canadensis*), z. obrovská (*S. gigantea*) alebo krídlatky (*Reynoutria* spp.) sú adaptované na vysoké hladiny živín v ekosystéme. Inváznedruhy sa šíria aj pozdĺž vodných tokov, keďže pre pobrežné kroviny, bylinné lemy tokov, nivné lúky a lužné lesy je typické kolísanie zdrojov a častejšie sú tu aj prírodné narušenia.

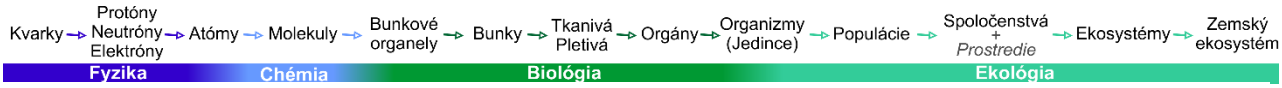
Upravené podľa: RICHARDSON et al. 2000; HOUSKA 2007; MIŽÍK 2008; BLACKBURN et al. 2011; MEDVECKÁ at al. 2012; PYŠEK et al. 2017; HEJDA et al. 2018, VAN KLEUNEN et al. 2018; PYŠEK 2018 a,b; DAISIE 2019

5.3.2 Hierarchia živých systémov a ich emergentné vlastnosti

Autopoietické siete sa rozvíjajú a vnárajú (integrujú) do ďalších sietí, vytvárajúc **zložité mnohovrstvové hierarchie**. Hierarchia (z gréc. *hierarkhia* – vláda vysoko postaveného kňaza) znamená, že každému prvku patrí určité miesto v systéme z pohľadu jeho podriadenosti a nadriadenosti voči iným komponentom systému.

Početnosť a diverzita prvkov sú na rôznych úrovniach organizácie rôzne, ale napriek tomu **naprieč hierarchiami živých systémov môžeme pozorovať jednotnú organizačnú tendenciu:** každý systém má svoje hranice a tvoria ho prvky nižšej úrovne a práve ich interakcie sú zdrojom emergetných vlastností, ktoré sa vynárajú na každej úrovni hierarchie (napr. reziliencia a funkčná redundancia ekosystému, JØRGENSEN et al. 2007). Súčasne je tento systém sám iba prvkom vnoreným do hierarchicky vyššieho celku (obr. 5.11 a 5.12): *„Systém je vnorený do systému a sám je tvorený systémami“* (KAY 2000).

Napr. organely sú integrované do hierarchicky vyššieho celku bunky, bunky do tkanív a pletív, tie do orgánov, orgány do sústav, sústavy do organizmov. Organizmy sa organizujú do populácií a metapopulácií, miestne populácie do spoločenstiev a ekosystémov. Topické (miestne) ekosystémy sa integrujú do ekologických systémov krajín a ekoregiónov, tie do biómov až do hierarchicky najvyššieho celku, Zemského ekologického systému. Jednotlivým hierarchiám sa venujú rôzne skupiny prírodných vied (obr. 3.8). Avšak porozumieť ľubovoľnému systému nie je možné iba z jednej hierarchickej úrovne, ale treba vždy uvažovať viac úrovní (KAY 2000), preto dnes rastie počet interedisciplinárnych štúdií.



Obr. 5.11. Schéma narastajúcej komplexity v prírode a rozdelenia „kompetencií“ jednotlivých prírodných vied. Hranice medzi nimi nie sú ostré a medzi jednotlivými vednými odbormi existujú prechodné vedecké disciplíny, ktoré využívajú poznatky dvoch susediacich odborov (napr. jadrová chémia, biochémia, molekulová biológia a pod.). Treba si uvedomiť, že takéto rozdelenie jednotlivých javov medzi rôzne prírodné vedy vytvoril pre svoje potreby človek a v prírode reálne neexistuje.
Schéma: © Radovan Malina, 2016.

Spontánny vznik hierarchického usporiadania je podmienený početnosťou a rozmanitosťou prvkov systému, ich interakcií a ich súhrou, t.j. posilňovaním ich koherencie a synchronizáciou ich pôsobenia. Napr. druhová diverzita spoločenstiev je ovplyvňovaná faktormi abiotických zložiek ekosystémov a interakciami jednotlivých druhov. Systém ako celok ju zas ovplyvňuje prostredníctvom spätných väzieb.

Zložité hierarchie umožňujú efektívnejšie využiť dostupnú energiu (ANILLA & KUISMANEN 2009) a súčasne tlmiť prírodné narušenia (disturbancie) už na nižších úrovniach, to znamená, že tieto menej zasahujú vyššie hierarchické úrovne. S rastom zložitosti a úrovne hierarchie spravidla narastá tiež **priestorový rozsah a dĺžka trvania biologických a ekologických procesov**, napr. od zlomkov sekúnd trvajúce procesy v bunkách až k stovkám rokov životného cyklu lesného ekosystému. Z toho vyplýva, že systémy vyšších hierarchických úrovní sa menia oveľa pomalšie ako systémy nižších úrovní (JØRGENSEN 2012).

Koncepcia holónu

Skúmanie integrácie systémov do systémov vyšších hierarchií vedie ku koncepcii holónu. **Holón** (z gréc. *„holos“* – celok a *„on“* – časť) označuje rozpoznateľný, kvázi-autonómny, organizačne pomerne uzavretý podcelok hierarchických biologických, ekologických alebo sociálnych systémov. Ide o **autoorganizačnú a autoregulačnú entitu,** systém pozostávajúci z prvkov a ich väzieb, pričom sám je iba funkčným prvkom vyššieho celku (KOESTLER 1969). Počet úrovní hierarchie je mierou jej hĺbky a počet holónov na rovnakej úrovni je mierou jej rozsahu (obr. 5.13).

Vybrané z hierarchickej organizácie zložitých biologických a ekologických systémov

Organická zlúčenina: zlúčenina, ktorá pozostáva predovšetkým z atómov uhlíka, vodíka a kyslíka, ale príp. tiež dusíka, fosforu, síry, chlóru, fluóru a ďalších chemických prvkov a ktorá je prevažne organizovaná do zložitých reťazcov, cyklov alebo ešte zložitejších štruktúr.

Organela: štruktúrna jednotka, podsystém bunky, špecializovaný na určitú metabolickú funkciu vnútri bunky, ktorá je spravidla ohraničená membránou (organelami sú napr. mitochondrie, plastidy, bunkové jadro, endoplazmatické retikulum, Golgiho aparát, centrioly, lyzozómy a iné).

Bunka: najmenšia ucelená jednotka života, ktorá je schopná transformácie energie, spotreby živín a reprodukcie využívajúc informáciu zapísanú v jej DNA. Najjednoduchšie bunky minimálne obsahujú plazmatickú membránu, cytoplazmu a DNA, zložitejšie aj rôzne druhy organel.

Pletivo resp. tkanivo: mnohobunková štruktúra špecializovaných buniek, ktoré sú organizované takým spôsobom, aby mohli vykonávať určitú spoločnú funkciu.

Orgán: mnohobunková štruktúra tvorená skupinou pletív resp. tkanív, ktoré sú organizované takým spôsobom, aby mohli vykonávať určitú spoločnú funkciu – orgánu ako celku.

Sústava orgánov: Systém tvorený skupinou orgánov organizovaných za účelom vykonávanie určitej spoločnej funkcie – sústavy orgánov ako celku.

Organizmus: indivíduum (jedinec), ktoré je tvorené jednou alebo viacerými (resp. mnohými) bunkami. Zložitejšie organizmy charakterizuje vyššia rozmanitosť, hierarchická štruktúra a vzájomná prepojenosť, buniek, pletív alebo tkanív, orgánov a ich sústav.

Populácia: skupina indivíduí (jedincov), organizmov rovnakého druhu, ktoré žijú v určitej konkrétnej lokalite a vzájomne sa krížia (podstatne častejšie ako s organizmami populácie iných druhov). Populácia je skupina jedincov rovnakého druhu, ktorá žije v spoločnom priestore a čase.

Druh: základná taxonomická jednotka organizmov spoločného pôvodu, ktoré sa odlišujú od iných jedincov, môžu sa vzájomne krížiť a mať plodných potomkov. To znamená odovzdávať genetickú informáciu a tým aj typické vlastnosti druhu do ďalšej generácie. Všetky vzájomne prepojené miestne populácie druhu v jeho areáli, t.j. ktorých jedinci môžu medzi sebou migrovať, vytvárajú metapopuláciu.

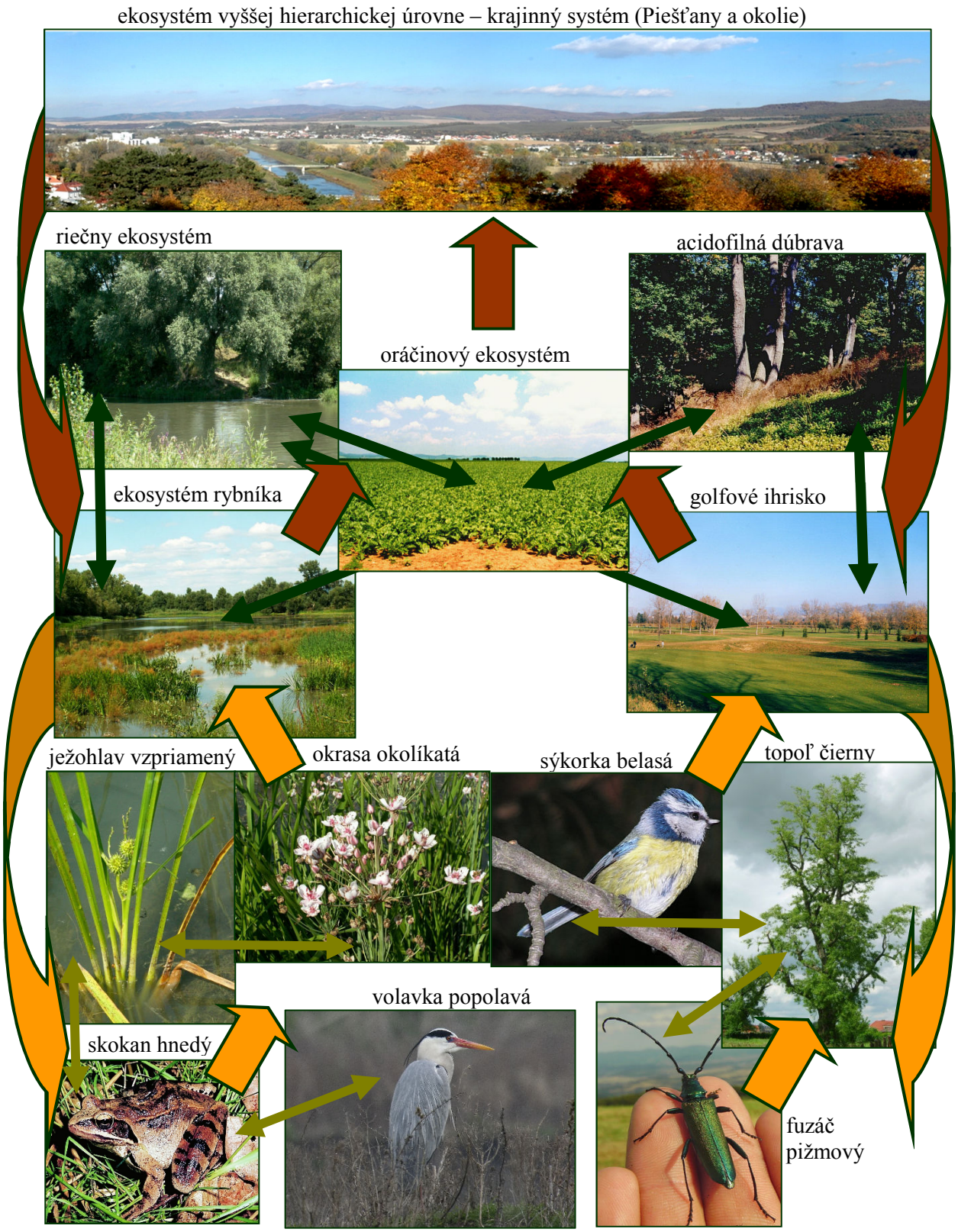
Biocenóza (biologické spoločenstvo): Vzájomne integrované zoskupenie populácií rôznych druhov organizmov, ktoré v rovnakom čase žijú na spoločnom stanovišti (obývajú spoločný priestor).

Ekosystém: vysoko komplexne biologicky a ekologicky organizovaná, dynamická a fyziognomicky rozpoznateľná funkčná entita. Jej prvky tvoria rastliny, živočíchy, huby a mikroorganizmy, ktoré v jednote s ich abiotickým prostredím vytvárajú integrovaný, funkčný a dynamický celok. Ekosystém charakterizujú hranice a fyzická štruktúra, interakcie organizmov navzájom a s ich abiotickým prostredím, určitá distribúcia postavenia (ník) druhov v ekosystéme. Interakcie organizmov vedú k novým emergentným vlastnostiam ekosystému. K ďalším patrí termodynamická otvorenosť, tok a premeny energie v trofických reťazcoch a obeh živín v organizačne relatívne uzavretom celku ekosystému, ako aj vysoká dynamika ekosystému, ktorej prirodzenou súčasťou sú aj jeho narušenia zásahmi zvonku, disturbancie.

Krajina, krajinný systém: Konkrétna heterogénna časť zemského povrchu, vytváraná rôznymi ekosystémami, ktoré sa v krajine opakujú a navzájom interagujú. Zložitý časopriestorový komplex, správnejšie systém tvorený vzájomnou interakciou horniny, reliéfu, pôdy, vody, ovzdušia, bioty a človeka, ktorý vytvára fyziognomicky a kvalitatívne odlišnú a zreteľnú územnú jednotku. Typy procesov v krajine a ich intenzita rozhodujú o premene krajiny z prírodnej na kultúrnu a o jej stave (ekologicky integrovaná alebo narušená, degradovaná krajina a i.). V kultúrnej krajine jej prírodné aj antropogénne podmienené prvky vstupujú do vzájomných vzťahov a vytvárajú vyšší sociálno-ekologický systém.

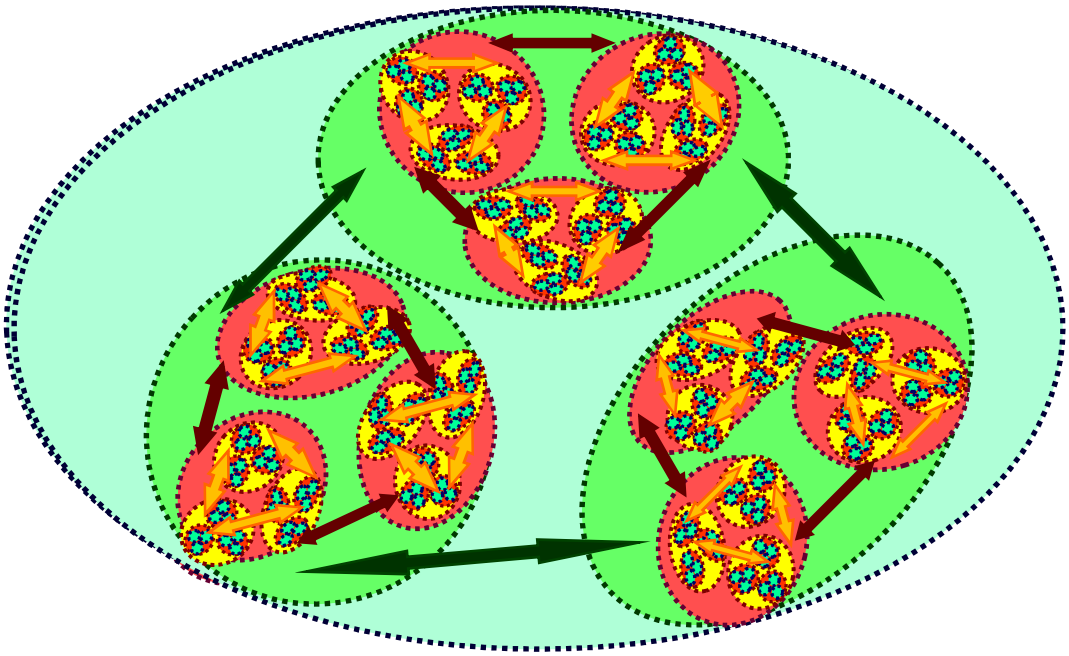
Biosféra, Zemský ekologický systém: Sféra prieniku litosféry, hydrosféry a atmosféry, v ktorej existuje život a ktorá udržiava podmienky preň a umožňuje jeho pokračovanie. V systémovom pohľade Zemský ekologický systém predstavuje najvyššiu úroveň organizácie a zložitosti živého systému na Zemi.

Upravené podľa: ODUM 1977; BEGON et al. 1997; ŽIGRAI 1997; MIKLÓS & IZAKOVIČOVÁ 1997; MIKLÓS 1998; MIČIAN 1999, 2008; SANDERSON & HARRIS 2000; RUŽIČKA 2000; DRDOŠ & MICHAELI 2001; ELIÁŠ 2007; STARR et al. 2013; FRANC et al. 2015



Obr. 5.12. Zjednodušená schéma integrácie biologických resp. ekologických entít do hierarchicky vyšších komplexných systémov. Užšie šípky medzi entitami rovnakej úrovne reprezentujú energetické alebo materiálové väzby medzi ekosystémami, resp. topické alebo trofické väzby medzi druhmi a biotopmi (v schéme nerozlišujeme juvenilné štádiá a dospelé jedince). Okruhy širších šípok (smerujúcich zhora dole) reprezentujú autoregulačné záporné spätné väzby hierarchicky vyššieho systému.
Schéma: © Peter Sabo, 2011 (SABO et al. 2011b), *námet podľa*: PARROTT 2002. *Foto*: © Stanislav Harvančík (volavka popolavá), Bruno Jakubec (krajina Piešťan), Pavlína Mišíková (oráčinový ekosystém, golfové ihrisko), Martin Sabo (fuzáč pižmový), Peter Sabo (acidofilná dúbrava, ekosystém rybníka, ježohlav vzpriamený, okrasa okolíkatá, skokan hnedý, topoľ čierny), Martin Štefánik (sýkorka belasá), Ingrid Turisová (riečny ekosystém).

Holónom je napr. organela, bunka, tkanivo, orgán, organizmus, spoločenstvo, ekosystém. Kým napr. stavebnými prvkami ekosystému sú druhy, ekosystémy sú iba podcelkami, stavebnými kameňmi celku krajiny, krajiny sú zas podcelkami ekoregiónu, tie podcelkami biosféry. Čím je holón na vyššej hierarchickej úrovni, tým je jeho životný cyklus dlhší a reprodukcia resp. obnova pomalšia. Napr. delenie väčšiny ľudských buniek prebieha každých 24 hodín (výnimkou sú nervové bunky, ktoré žijú počas celého života organizmu), kým dĺžka ľudského života sa ráta na desaťročia. Podobne životný cyklus ekosystému sa ráta na roky, desaťročia až stáročia (napr. v prípade dubového lesa).



Obr. 5.13. Ilustrácia koncepcie holónu ako organizačnej jednotky. Holón je systém, ktorý pozostáva z prvkov a súčasne sám je prvkom integrovaným v hierarchicky vyššom systéme. Napriek odlišnosti typov prvkov rôznych úrovní hierarchie môžeme vypozorovať určité spoločné organizačné princípy. (Kvôli prehľadnosti je v ilustrácii znázornená najmä hierarchia systémov.) *Schéma:* © Peter Sabo.

Z funkčného hľadiska holón charakterizujú **pevné pravidlá, tzv. kánon holónu**, ktoré definujú možný vývoj funkčné limity systému (KAY 2000), patrí sem špecializácia a možnosti interakcií prvkov systému (podobne ako pravidlá určujú možné ťahy figúrkami v šachu). Napr. pri vývoji organizmu zo zárodočnej bunky sa postupne objavuje diverzita, priestorové rozmiestnenie a časové poradie vývoja jednotlivých typov buniek a tkanív, to znamená, že jednotlivé bunky sú napriek rovnakému genetickému kódu **podriadené určitému organizačnému vývojovému poriadku** (TREWAVAS 2006). Tento poriadok sa naruší, ak určitú časť pletiva izolujeme od rastliny – správanie jeho buniek bude zrazu iné.

V prípade spoločenstva a ekosystému je **analogickým organizačným princípom** postupné striedanie diskrétnych sukcesných fáz smerom ku klimaxu, ktorého súčasťou je zvyšovanie energetického výkonu spoločenstva ako celku a zmena jeho druhového zloženia, vrátane postupného nahrádzania oportunistických r-stratégov stenotopnými druhmi, K – stratégmi. A správanie organizmu sa môže aspoň čiastočne zmeniť, ak ho vytrhneme z jeho prirodzeného prostredia a umiestnime napr. do ZOO.

Napríklad vnáranie a integráciu podcelkov živých systémov do zložitých hierarchií umožňuje **špecifická čiastková priepustnosť (semipermeabilita) hraníc holónu.** Táto semipermeabilita umožňuje rozčleniť živé systémy ako relatívne organizačne uzavreté, autentické funkčné jednotky a súčasne umožňuje ich interakcie a na ich báze vnáranie (integráciu) systémov do systémov vyšších hierarchií. V prípade ekosystému síce nehovoríme o integrácii a reprodukcii v takom tesnom zmysle ako pri bunke a organizme, avšak aj tieto majú svoje životné cykly (napr. 200 rokov bukového lesa, resp. 400 rokov smrekového lesa) a po disturbanciách sa dokážu samy spontánne obnoviť.

Emergentné vlastnosti

V každom systéme môžeme odlíšiť sumárne (kumulatívne) a emergentné vlastnosti (SEP 2015). **K sumárnym vlastnostiam** stromu patrí napr. index listovej plochy ako sumárna veľkosť jeho listovej plochy nad určitou jednotkou plochy povrchu pôdy. Sumárnou vlastnosťou populácie je napr. priemerný vek jej jedincov alebo priemerné zloženie potravy daného druhu, v prípade ekosystému je to napr. napr. výpočet objemu CO_2 absorbovaného jednotkou plochy ekosystému. Kumulatívne vlastnosti systému je možné s využitím štatistiky jednoducho odvodiť z vlastností jeho prvkov (KURAS 2013).

Inú kategóriu predstavujú **emergentné vlastnost**i živých systémov, ktoré ako prví definovali dvaja významní ekológovia, bratia Eugen Pleasants Odum a Howard Thomas Odum (ODUM 1977). Na každej úrovni hierarchií zložitých systémov je totiž možné pozorovať nové vlastnosti, ktoré nie sú známe z nižších hierarchických úrovní a nemožno ich odvodiť z vlastností jednotlivých prvkov vlastnosti. Ide o kvalitatívne nové, emergentné vlastnosti, ktoré sa „vynárajú" na úrovni celku a **vznikajú práve v dôsledku interakcií prvkov systému**. *„Systém je integrovaný celok, ktorého vlastnosti nemožno redukovať na vlastnosti jeho prvkov"* (CAPRA 1984).

Objavenie sa emergentných vlastností na každej novej úrovni hierarchie patrí k základným organizačným princípom v chémii, biológii aj v ekológii. Napr. v prípade vody patrí k takýmto vlastnostiam kohézia (súdržnosť jej molekúl), ktorá umožňuje vode tiecť a adhézia (priľnavosť), ktorá jej umožňuje stúpať kapilárami rastlín až do korún najvyšších stromov tropického pralesa dosahujúcich výšku až 60 m. Takéto vlastnosti však nemajú kyslík ani vodík, chemické prvky, ktoré vytvárajú molekulu H_2O. V biológii je napr. známe, že jedným z ukazovateľov života aj zdravia väčšiny živočíchov je srdcový pulz, pričom túto vlastnosť opäť nemôžeme odvodiť z vlastností jednotlivých buniek, ktoré tvoria srdce.

V prípade ekosystému k **jeho významným emergentným vlastnostiam** patrí napr. biologická rozmanitosť (biodiverzita), heterogenita biotopov podmienená rôznorodosťou fyzikálnych a chemických podmienok prostredia, biotickými interakciami aj prírodnými narušeniami ekosystému, ďalej je to napr. obeh vody (v malom vodnom cykle) a živín v ekosystéme, ako aj celková konektivita prvkov ekologického systému. Tu môžeme rozlíšiť vertikálnu konektivitu v rámci potravných sietí a horizontálnu konektivitu medzi jednotlivými miestnymi populáciami a biotopmi (napr. BENNET 2003; AMENT et al. 2014).

Z hľadiska udržateľného využívania biologických prírodných zdrojov sú významnými emergentnými vlastnosťami ekosystému predovšetkým ekologická odolnosť (ekologická rezistencia) voči narušeniam zvonka a ešte viac ekologická pružnosť (ekologická reziliencia), schopnosť a rýchlosť návratu ekosystému do pôvodného stavu po odoznení narušenia. Tieto vlastnosti sa opäť nedajú odvodiť z vlastností jednotlivých organizmov – odolnosť ekosystému je výsledkom dynamickej súhry jeho komponent, napr. v prípade lesa synergie dynamiky životných dráh jednotlivých stromov alebo malých porastov. Podobne až na úrovni Zemského systému sa vynárajú globálne biogeochemické cykly, nevyhnutné pre život organizmov (napr. prísun vody do vnútrozemia kontinentov cez veľký vodný cyklus).

Niektoré otázky hierarchickej organizácie systémov

K aktuálnym výzvam systémovej ekológie patria otázky, ako sú autopoietické siete rôznych úrovní vzájomne prepojené, ako **interagujú naprieč rôznymi hierarchiami** resp. ako na jednotlivých hierarchických úrovniach vznikajú emergentné vlastnosti (napr. odolnosť ekologického spoločenstva voči narušeniam alebo jeho druhová diverzita) prostredníctvom interakcií na nižších úrovniach (LEVIN 2005).

Ekologické systémy a sociálno-ekologické systémy sú typické **zložité adaptívne systémy** (CAS – *complex adaptive systems*, LEVIN 1998), ktoré vytvárajú celú škálu do seba vnáraných hierarchií. Tieto hierarchie sa vynárajú v dôsledku interakcií prvkov nižších hierarchických úrovní. Každú z takto vyvinutých úrovní charakterizujú jej typické prvky, ich vzájomné interakcie a dynamika celku. Tieto sa vzájomne ovplyvňujú, napr. narušenie fyzickej štruktúry a interakcií rastlinného spoločenstva prienikom inváznych druhov môže zablokovať sukcesný proces a tým prirodzenú dynamiku celku systému.

Na každej hierarchickej úrovni môžeme rozlíšiť **pôsobenie zdola** – vplyv prvkov nižších úrovní na systém vyššej hierarchie a **pôsobenie zhora** – vplyv systému na prvky nižšej hierarchie (JØRGENSEN et al. 2007). V prvom prípade prvky nižšej úrovne ovplyvňujú štruktúru a správanie vyššej úrovne, napr. ekologické podmienky ovplyvňujú rast aj distribúciu druhov v rastlinnom spoločenstve. V druhom prípade vyššia úroveň obmedzuje správanie prvkov nižšej úrovne – napr. spektrum druhov, ktoré sa vyskytujú v hierarchicky vyššom ekoregióne alebo bióme, určuje možné kompozičné rámce pre spoločenstvo.

Systém musí **obmedzovať správanie jeho prvkov** za účelom udržania svojej integrity a funkčnosti ako hierarchicky vyššieho celku. Príkladom je integrácia štruktúry a funkcií 100 000 rôznych druhov proteínov v rastlinnej bunke alebo integrácia rôznych typov buniek v liste rastliny do koherentného systému (TREWAVAS 2016). Podobne aj integrácia rozmanitých a početných druhov v ekosystéme do funkčného celku, ktorý v konečnom dôsledku podporuje aj našu vlastnú, ľudskú existenciu.

Podľa GOLDSMITHA (1996) organizácia každého ekosystému prispieva k integrite hierarchicky najvyššieho známeho ekologického systému – Zemského systému. *„Životné procesy a evolúcia budujú stále zložitejšie usporiadanie... Každej hierarchickej úrovni prislúcha optimálny stupeň usporiadania. Usporiadanie možno definovať aj ako vplyv celku na jeho časti.“* (GOLDSMITH 1996).

Zhrnutie kapitoly 5

Celostnosť, chaos a zložitosť

1) Jednou z reakcií na Descartesov redukcionizmus sa stal aj **holizmus, filozofia celostnosti**, snahy o porozumenie celku systému. Pojem prvý použil v roku 1926 juhoafrický politik Jan Smuts a do štúdia ekosystémov ho zaviedol ekológ **John Phillips**, ktorý tvrdil, že ekologické spoločenstvá sú harmonické, čím podporil Clementsovu predstavu biotického spoločenstva ako superorganizmu. Holizmus v juhoafrickom vydaní sa však zdiskreditoval, belosi ho využili na odôvodnenie apartheidu.
2) **Podľa teórie chaosu** aj za silne náhodným, chaotickým správaním zložitých dynamických systémov môžeme nájsť určité pevné pravidlá, ktoré toto správanie generujú. Patria medzi ne napr. pravidlá a charakteristiky interakcií prvkov systému, jeho spätné väzby, autoorganizačné a autoregulačné mechanizmy, ako aj existencia polarít v prírode. Napr. aj zdanlivý chaos oscilácií veľkosti populácií druhov v spoločenstve je generovaný deterministickými pravidlami interakcií jednotlivých druhov.
3) Teória chaosu pomáha študovať zložité systémy, ktoré charakterizuje **extrémna citlivosť k počiatočným podmienkam**, čím je ich správanie ťažko predvídateľné. Dynamiku zložitého systému pomáhajú charakterizovať geometrické obrazce, **podivné atraktory** vytvárané nestabilnými periodickými orbitálnymi dráhami postupností stavov systému vo fázovom priestore. Základné charakteristiky orbitálnych dráh v tomto priestore sa opakujú aj pri zmenách počiatočných podmienok.
4) Zložitosť systému má dva piliere: prvým je **organizácia fyzickej štruktúry v priestore**, ktorá spočíva vo variabilite prvkov, väzieb medzi nimi a v ich účelnom opakovaní a priestorovom rozmiestnení. Druhým pilierom je **organizácia interakcií, procesov a funkcií v čase**, ktorá spočíva v opakovaní určitých interakcií a procesov realizovaných na fyzickej štruktúre. Ontogenetický aj evolučný vývoj biologických aj ekologických systémov zväčša **charakterizuje spontánny rast zložitosti** fyzickej štruktúry aj správania systému.

Základné organizačné a regulačné mechanizmy

5) **Spätná väzba ako kritický organizačný mechanizmus** predstavuje kauzálnu slučku, ktorá spôsobuje, že efekt na výstupe systému spätne ovplyvňuje vstup do systému, ktorý daný efekt vyvolal. Podľa účinku rozlišujeme kladnú spätnú väzbu, ktorá zosilňuje zmenu na vstupe do systému a zápornú spätnú väzbu, ktorá zmenu na vstupe zoslabuje. Záporná spätná väzba sa nazýva aj stabilizačná, príkladom je nárast populácie predátorov po gradácii populácie koristi, ktorý túto gradáciu potlačí.
6) Príkladom nebezpečného **autokatalytického cyklu** na báze kladných spätných väzieb medzi zmenou klímy a odlesňovaním je riziko straty život podporujúcich a regulačných ekosystémových služieb,

ktoré ľudstvu poskytuje Amazonský dažďový prales. Pri dlhotrvajúcom suchu a vysokej teplote sa totiž prales v dôsledku zvýšeného rozkladu organickej hmoty mení z absorbéra CO_2 na jeho zdroj. Napr. storočné sucho v roku 2005 viedlo k extrémne nízkym zrážkam na 37 % rozlohy Amazónie a v roku 2010 až na 57 % sa tu spomalil rast vegetácie a výrazne stúpol rozklad odumretej biomasy;

7) Základnými komplementárnymi organizačnými a regulačnými procesmi v prírode aj v spoločnosti sú autoorganizácia a autoregulácia. **Autoorganizácia (samoorganizácia)** označuje spontánny vznik a vývoj usporiadaných fyzických štruktúr, na nich prebiehajúcich procesov a funkčných vzorcov. Ich zdrojom sú početné interakcie prvkov systému, pričom spontánnosť znamená, že ide o autonómny, samovoľný proces, ktorý nie je riadený zvonku systému (súčasne prebieha podľa určitých pravidiel).
8) Autoorganizácia sa v prírode prejavuje ako **tendencia rastu zložitosti systému**, či už ide o neživú prírodu (napr. kryštály, konvekčné slučky zohrievanej vody, zoskupovanie atómov a molekúl v chemických zlúčeninách) alebo o biologické a ekologické systémy. Umožňuje vnáranie a integráciu jednoduchších systémov do zložitejších systémov vyšších hierarchií. Z hľadiska termodynamickej teórie je podstatou autoorganizácie vyrovnávanie sa s prísunom energie do systému prostredníctvom vytvárania adekvátnych štruktúr a procesov, ktoré ju dokážu transformovať, konzervovať a využiť.
9) Polárnym princípom k vývoju a rozvoju zložitého živého systému je udržanie jeho dosiahnutého usporiadania. Autoregulácia (samoregulácia) označuje procesy spontánneho udržiavania usporiadanosti, ktoré na každej úrovni hierarchie živého systému udržiavajú jeho dynamickú rovnováhu – homeostázu. Tieto procesy spontánne udržiavajú alebo reprodukujú relatívne konštatné vnútorné podmienky systému (a tým aj jeho podstatné vlastnosti) aj pri zmene podmienok vonkajšieho prostredia.
10) Mechanizmy homeostázy fungujú na báze záporných spätných väzieb a **vyrovnávajú oscilácie** systému spôsobené zmenou podmienok prostredia, t.j. narušeniami zvonku a tým udržiavajú podstatné charakteristiky štruktúry a vzťahov v systéme. **Podstatou mechanizmu homeostázy** je autoregulácia kritických premenných na báze spätných väzieb za účelom udržiavania ekologickej rovnováhy systému. **Homeodynamika** označuje prestavovanie mechanizmov homeostázy počas životnej dráhy systému.
11) **Polarita** vyjadruje vzťah medzi dvomi protichodnými hodnotami určitej veličiny alebo medzi dvomi protichodnými procesmi alebo princípmi. Je zdrojom napätia medzi dvoma pólmi, ktoré vždy spúšťa dynamiku protikladne pôsobiacich procesov. Z princípu hry polarít vychádza aj pojem dynamickej **ekologickej rovnováhy** ako schopnosti ekosystému vyrovnávať pôsobenie vplyvov a zmien jeho okolia a napriek nim si zachovávať svoju prirodzenú štruktúru, typické vlastnosti a funkcie.
12) **Základom symetrie** je proporčnosť tvarov, farieb a vôní v prírode, ktorá má estetický, ale aj funkčný význam, napr. umožňuje let vtákov, pohyb zvierat. **Symetria má viac významov.** Napr. vo fyzike znamená odolnosť, **invariantnosť systému** voči jeho rôznym transformáciám. Napr. univerzálne prírodné zákony (ako sú v kapitole 4 priblížené prvý a druhý termodynamický zákon) sa považujú za symetrické v priestore a čase, čo znamená, že tieto zákony sa v rámci nášho 4-rozmerného časopriestoru nemenia.

Siete a hierarchie živých systémov

13) **Základnou organizačnou štruktúrou živého systému je sieť** pozostávajúca z jeho vzájomne prepojených a interagujúcich prvkov. Rozmanité interakcie a mechanizmy spätných väzieb zabezpečujú koherentnosť a funkčnosť celku systému synchronizáciou aktivít jeho prvkov. Príkladmi sú proteíny ako siete aminokyselín, bunky ako siete organel, neurónové siete v mozgu, trofické siete v ekosystéme, metapopulačné siete miestnych populácií, ekologické siete tvorené biocentrami a biokoridormi.
14) **Synergia** znamená súčinnosť, spolupôsobenie aspoň dvoch faktorov, ktoré je silnejšie ako súčet individuálnych pôsobení. V biológii vyjadruje napr. schopnosť buniek fungovať spolu prospešne v mnohobunkovom organizme. Naopak, v environmentalistike môže označovať negatívne synergické pôsobenie viacerých faktorov, napr. zmeny klímy, odlesňovania, úbytku biodiverzity, znečisťovania, vyčerpávania vodných zdrojov, dezertifikácie a pod. Synergia zvyšuje nelinearitu správania systému.
15) **Autopoietická sieť** je metabolická sieť, ktorej prvky sa neustále vzájomne ovplyvňujú, umožňuje

spontánny rast a vývoj (sebavytváranie), a kontinuálnu sebaobnovu živého systému. Ide o sieť produkčných procesov, v ktorej je úlohou každého prvku reagovať na aktivity jeho blízkych aj vzdialených susedov a prostredníctvom interakcií sa zúčastňovať na tvorbe alebo transformácii iných prvkov. Vysoká zložitosť spätnoväzobných okruhov v tejto sieti vedie k jej nelineárnemu správaniu.

16) Koncepcia autopoietickej siete vedie k novému pohľadu na organizmy, populácie a druhy. Kým redukcionistický prístup kladie dôraz na definíciu druhu podľa jeho morfológie, fyziológie, reprodukcie a dnes najmä genetického kódu, **systémový prístup rozširuje definíciu druhu aj na jeho interakcie v danom prostredí**, ktoré determinujú jedinečné charakteristiky druhu. Životné prostredie druhu vytvára kontext, v ktorom sa tento evolučne vyvíjal a vyvíja. Problém môže nastať, ak do tohto kontextu príde nepôvodný druh, ktorý sa evolučne vyvinul v geograficky inom území. Časť nepôvodných druhov naruší autopoietické siete systému a stane sa inváznymi druhmi.

17) **Hierarchia** znamená, že každému prvku patrí v živom systéme konkrétne miesto z pohľadu jeho podriadenosti resp. nadriadenosti voči iným komponentom. Naprieč rôznymi hierarchiami možno vidieť jednotnú organizačnú tendenciu: každý zo systémov má svoje hranice, je tvorený prvkami nižšej úrovne a ich interakciami a súčasne sám je prvkom vnoreným do hierarchicky vyššieho celku. Napr. organely sú integrované v živej bunke, bunky sa integrujú do tkanív a pletív, tie do orgánov, orgány do sústav, sústavy do organizmov... Organizmy sa organizujú do populácií a metapopulácií, miestne populácie do spoločenstiev a ekosystémov, ekosystémy miestnej úrovne do krajín a ekoregiónov, až po Zemský ekosystém.

18) Pojem holón označuje autoorganizačnú a autoregulačnú entitu, systém, ktorý pozostáva z prvkov a sám je prvkom vyššieho celku. Počet úrovní hierarcie je mierou jej hĺbky a počet holónov na rovnakej úrovni je mierou jej rozsahu. **Vnáranie a integráciu holónov živých systémov** do zložitých hierarchií umožňuje semipermeabilita hraníc holónu. V jej dôsledku sú živé systémy relatívne organizačne uzavreté, autentické funkčné jednotky a súčasne interagujú a vnárajú sa do systémov vyšších hierarchií.

16) Na každej úrovni hierarchií zložitých systémov je možné pozorovať kvalitatívne nové vlastnosti, ktoré nie sú známe z nižších hierarchických úrovní a nemožno ich odvodiť z vlastností jednotlivých prvkov. Ide o emergentné vlastnosti, ktoré sa vždy „vynárajú“ na úrovni celku a **vznikajú práve v dôsledku interakcií prvkov systému**. Obajvenie sa emergentných vlastností na každej novej úrovni hierarchie patrí k základným organizačným princípom v chémii, biológii aj v ekológii.

Otázky

1) Na čo nás môže upozorniť teória chaosu pri štúdiu ekosystému?
2) Vysvetlite mechanizmus kladnej / zápornej spätnej väzby.
3) Čo je to autoorganizácia? Charakterizujte jej tri základné procesy.
4) Charakterizujte autoreguláciu, mechanizmus homeostázy a homeodynamiky.
5) Ako by sme mohli zhrnúť ekologický význam polarity v ekologických systémoch?
6) Čo je to súmernosť (symetria)? Aký je rozdiel medzi symetrickou a asymetrickou konkurenciou?
7) Charakterizujte sieťovú architektúru. Čo je to autopoietická sieť a ako funguje?
8) Prečo majú zložité systémy nelineárne správanie?
9) Prečo sa narušenie autoregulačných mechanizmov neprejaví ihneď?
10) V čom spočíva hierarchia biologických a ekologických systémov? Čo je to holón?

Kritické zamyslenie

1) Naozaj platí, že porozumieť živému systému znamená porozumieť jeho usporiadaniu?
2) Prečo vedci diskutujú o hrozbe savanizácie Amazonského pralesa? Zdieľate ich obavy?
3) Ako podľa Vás súvisí symetria (resp. aj asymetria) s krásou zjavnou v živej prírode?

„Pre tých, ktorí sa zamýšľajú nad krásami Zeme, je naša planéta prameňom sily na celý život. Veď symboliku i skutočnú krásu môžeme nachádzať v sťahovaní vtákov, v prílivoch a odlivoch, v zvinutom pupeni, ktorý sa pripravuje na jar. V opakovaných refrénoch hudby prírody je niečo krásneho a utešujúceho, je to uistenie, že po noci opäť prichádza svitanie, po zime opäť jar".

Rachel Carson

6 Ekologická zložitosť a nerovnovážna termodynamika živých systémov

Vnímanie typických prejavov života závisí od uhla pohľadu. Kým ten biochemický kladie dôraz na organické zlúčeniny ako základné stavebné kamene, biologický pohľad zdôrazňuje rast, reprodukciu a evolúciu, ale aj starnutie a smrť organizmu. Systémový ekologický pohľad zahŕňa nielen vzájomné interakcie organizmov a populácií (a interakcie s ich okolím), ale dôraz kladie aj na toky energie, hmoty, informácie a na spoločné princípy organizácie zložitých ekologických systémov. Tieto systémy charakterizuje vysoká biodiverzita aj vysoká dynamika, ako výsledok synergie abiotických podmienok, biotických interakcií aj narušení. Ekologická zložitosť otvára ďalšie otázky, osobitne ekologickej integrity a nerovnovážnej termodynamiky – od koncepcie disipatívnych štruktúr a procesov až k adaptívnym vývojovým cyklom ekosystému.

Zložitosť ako základný atribút života

Tendencia k rastu zložitosti štruktúry aj správania patrí k základným charakteristikám živých systémov. Jej generátorom v ekosystéme sú interakcie miestnych populácií druhov, zložitosť vyššieho celku tu vzniká spontánne na báze lokálnych interakcií prvkov nižšej úrovne hierarchie.

Chaos alebo vysoká úroveň organizácie, ktorá presahuje naše chápanie? Národná prírodná rezervácia Dobročský prales. *Foto:* © Peter Urban, 2018.

Štrukturálnu zložitosť ekosystému okrem abiotických faktorov indikujú počty a rozmanitosť druhov v spoločenstve, priestorová distribúcia a veková štruktúra jedincov a populácií, vertikálna výstavba vegetácie a hĺbka hierarchie ekosystému. Funkčnú zložitosť indikuje napr. organizácia tokov energie v potravnej sieti. K obrazu zložitosti patrí integrácia prvkov podľa jedinečných organizačných vzorcov (*patterns*), ktorá zabezpečuje funkčnosť celku.

Každý živý systém má určitú prirodzenú úroveň svojej zložitosti, t.j. zložitosti jeho organizácie. Aj v chránených územiach by sme pri manažmente ekosystémov mali podporovať jej udržanie resp. obnovu a zvažovať aj ich budúci vývoj. Najmä v podobe opatrení, ktoré vedú k vyššej biotopovej a druhovej diverzite, ale súčasne podporujú aj prirodzenú dynamiku ekosystému. Napr. ponechávanie veľkých starých stromov v boreálnych lesoch a lesoch mierneho pásma znamená udržiavať biotopy pre mnohé druhy vtáctva a ďalších živočíchov. S udržiavaním zložitosti súvisí aj širšie spektrum funkcií daného ekosystému a tým aj pre človeka dostupných ekosystémových služieb.

Súbežné sledovanie viacerých cieľov v kombinácii s nelinearitou správania ekosystému zvyšuje nároky na manažment. Znamená to aj rozšíriť dôraz z druhov a biotopov aj na ochranu procesov a funkcií ekosystému. Prirodzená úroveň zložitosti sa aj tu premieta do jeho vitality. Napr. rôznoveký a druhovo pestrý lesný porast je nielen zložitejší, ale aj vitálnejší ako smreková monokultúra. Nezabudnime, že organizmy a ekosystémy sú najzložitejšie známe štruktúry vo vesmíre, pretože zložitosť systému nie je iba o počtoch a veľkostiach prvkov. Dôležité tiež je, že vedie k nelineárnemu aj neočakávanému správaniu, na ktoré je nutné reagovať adaptívnym manažmentom.

Upravené podľa: Heylighen 1999; Michener et al. 2001; Levin 2005; Urban et al. 2018; Machar et al. 2019

Z predošlých kapitol už vieme, že biologické a ekologické systémy charakterizuje aj **tendencia spontánneho rastu ich zložitosti** (PROULX 2007), v priebehu rastu a dospievania, ako aj v priebehu evolúcie týchto systémov. Táto tendencia sa prejavuje spravidla súbežne v raste zložitosti organizácie fyzickej štruktúry (štrukturálna zložitosť) a v raste zložitosti procesov, spätnoväzobných okruhov a funkcií príslušného ekologického systému v čase (funkčná, behaviorálna zložitosť).

Úroveň zložitosti živého systému súvisí s veľkosťou prísunu energie, čím je tento prísun vyšší, tým viac jej môže využiť na rozvíjanie svojho štrukturálneho aj behaviorálneho usporiadania v podobe nových štruktúr a procesov. Rovnaký objem energie aký systém prijme, musí aj exportovať, pričom do okolia exportuje entropiu. Takto chápaná zložitosť potvrdzuje tvrdenie, že najzložitejšími štruktúrami v človekom poznanom vesmíre sú práve biologické a ekologické systémy na Zemi (REES 2004).

Zdá sa, že aj priestorový a časový rozsah biologických a ekologických procesov sa zvyšuje s rastom zložitosti. V kombinácii s nelinearitou zložitých systémov to znamená, že ľudská intervencia do prírodných alebo poloprírodných systémov alebo do ďalších život udržiavajúcich systémov, k akým patrí napr. klimatický systém Zeme, **sa môže prejaviť až po dlhšom čase**, kedy už môžu byť naštartované nevratné procesy, ktoré nemusí byť v silách spoločnosti zvládnuť. Preto potrebujeme k prírode pristupovať na báze princípu predbežnej opatrnosti, napr. dopriať dostatočný priestor pre bezsásahové územia.

6.1 Od ekologickej zložitosti k ekologickej integrite

Podľa termodynamickej teórie ekologických systémov (JØRGENSEN & SVIREZHEV 2004) **biologická a ekologická zložitosť, komplexita,** predstavuje „spontánnu odpoveď" živého systému na určité, relatívne stabilné vonkajšie prostredie a na určitý prísun energie, za účelom čo najlepšie využiť túto energiu a ďalšie dostupné prírodné zdroje, čo sa nazýva aj princípom maximálneho výkonu (ODUM 1977).

V predošlej kapitole sme si priblížili základnú fyzickú architektúru aj niektoré ďalšie spoločné princípy organizácie zložitých živých systémov. V tejto časti sa pristavíme pri ekologickej zložitosti z pohľadu jej základných dimenzií a priblížime si koncepciu **ekologickej integrity**, ktorá je snahou ako sa vysporiadať s vysokou zložitosťou nášho sveta, a to nielen na úrovni fyzickej štruktúry, ale aj dynamiky. Zložitosť je totiž síce nevyhnutnou, ale nie postačujúcou podmienkou fungovania ekosystémov a sociálno-ekologických systémov (tie vznikajú integráciou prírodných a antropogénnych systémov). Ďalšou podmienkou je ich integrita, ktorá sa odvíja od koncepcie „zdravia ekosystémov" (ELIÁŠ 2002). „Ekologicky zdravý" je taký systém, ktorý nevykazuje poškodenie, je (ekologicky) integrovaný.

6.1.1 Hľadanie základných dimenzií ekologickej zložitosti

Biologická a ekologická zložitosť je podmienkou udržania života. Bez jeho zložitého pradiva by neexistovala ani ľudská socio-ekonosféra (nazývaná aj noosféra, pozri kapitolu 1) – z histórie vieme, že **staroveké civilizácie vznikali skôr v prostredí produkčnejších ekosystémov a krajín**, čo viedlo k vývoju ešte zložitejších ekologicko-sociálnych systémov. Poznanie konkrétnych zdrojov zložitosti, ktorá vzniká interakciami biologických, ekologických a ďalších objektov, je zatiaľ nedostatočné (MICHENER et al. 2001). Navyše za pomerne rozsiahlou teóriou zatiaľ výrazne zaostávajú konkrétne užitočné aplikácie.

O vytvorenie **empiricky orientovaného koncepčného rámca** sa pokúsili CADENASSO et al. (2006), pričom sa orientujú primárne na štruktúru ekologického systému ako hlavný zdroj zložitosti správania systému, ktorého významné aspekty sú nelineárna dynamika, autoorganizácia a emergentné vlastnosti. Ich šúdia vychádza zo synergie viacerých definícií biologickej zložitosti, najmä ako „*vlastností vynárajúcich sa v dôsledku súhry biologických, fyzických a sociálnych interakcií, ktoré sú ovplyvňované, udržiavané a modifikované živými organizmami, vrátane ľudí*" (MICHENER et al. 2001), *zahŕňajúc „nelineárnu alebo chaotickú dynamiku, nepredvídateľné správanie a interakcie, ktoré preklenujú viacnásobné úrovne biologickej organizácie resp. časovopriestorových mierok*" (COTTINGHAM 2002) a ďalších.

CADENASSO et al. (2006) definujú **tri osi ekologickej zložitosti**: priestorovú heterogenitu, organizačnú spojitosť a historickú kontingenciu, ako rámec zjednocujúci rôzne koncepcie zložitosti. Vypomáhajú si pritom paradigmou plôšok a ich dynamiky (PICKETT & WHITE 1985) známou z krajinnej ekológie. Tu plôška označuje najmenšie identifikovateľné zrno pre zvolenú úroveň hierarchie, jednotlivé plôšky zodpovedajú napr. rôznym typom krajinnej pokrývky (lesu, lúke, sídlu, atď.). Jednotlivé plôšky sa odlišujú štruktúrou, kompozíciou, funkciou a dynamikou. (Krajina sa v krajinnej ekológii definuje ako heterogénna časť zemského povrchu, geograficky vymedzená podľa určitého kritéria, v ktorej sa opakujú a vzájomne interagujú rôzne typy ekosystémov.)

Tri osi zložitosti v Cadenassovom modeli štrukturálnej zložitosti

Priestorová heterogenita vyjadruje rozmanitosť a usporiadanosť prvkov v priestore. V krajine sa zväčšuje smerom od typového bohatstva plôšok, cez frekvenciu ich výskytu, konfigurácie a zmeny ich mozaiky až po najvyššiu úroveň zložitosti podľa tejto osi, za ktorú sa považuje posúvajúca sa mozaika plôšok.

Organizačná spojitosť, konektivita, vyjadruje ako sú jednotlivé prvky spolu prepojené a vzájomne interagujú, určuje dynamiku systému a je zdrojom jeho reziliencie. V krajine sa zvyšuje od prepojení vnútri plôšky cez jej interakcie s ďalšími plôškami a ich hranicami, až po najvyššiu úroveň, za ktorú sa považuje dynamika funkčných plôšok, ktoré ovplyvňujú iné plôšky, ako aj samotnú mozaiku plôšok.

Historická kontingencia (historické nepredvídané udalosti) sa týka vplyvov na plôšky, ktoré sa menia v čase. V krajine sa zvyšuje smerom od súčasných priamych vplyvov na plôšky cez nepriame vplyvy a dedičstvá (vplyvy na prostredie, ktoré sa prejavujú aj na plôškach), až po pomalé nepriame vplyvy.

Upravené podľa: CADENASSO et al. 2006

Štúdia Cadenassovho tímu patrí ku **kľúčovým teoretickým prácam** pre porozumenie ekologickej komplexite. Dôležité je, že načrtnutý rámec zahŕňa nielen význam priestorovej heterogenity (počtov, rozmanitosti a rozmiestnenia jednotlivých prvkov), ale kladie dôraz aj na aspekty organizácie v podobe spojitosti prvkov, uvažujúc prepojenia vnútri plošiek aj medzi nimi a tiež uvažuje časové súvislosti.

Problém je, že daný rámec sa sústreďuje iba na jeden pilier zložitosti – fyzickú štruktúru, spojitosť jej prvkov a jej zmeny (štrukturálna zložitosť). Navyše rámec je značne abstraktný a preto **vytvorenie indikátorov zložitosti podľa jednotlivých osí nebude jednoduché** a v reálnom prostredí ťažšie kvantifikovateľné, samotní autori ilustrovali iba jednu os (priestorovú heterogenitu) pri hodnotení zložitosti urbánnej krajiny, pričom spojili krajinno-ekologické a sociálne aspekty (CADENASSO et al. 2006).

Rozvinutie rámca ekologickej zložitosti pre účely jej hodnotenia

Vychádzajúc z načrtnutých definícií a koncepcií ekologickej komplexity, z typológie základných skupín vzťahov v ekosystéme a v krajine (BEGON et al. 1997; MICHENER et al. 2001; SUGIHARA 2017) a reflektujúc obmedzenia vyššie načrtnutého modelu, za **tri základné dimenzie, piliere ekologickej zložitosti** navrhujeme model, ktorý pokrýva štrukturálne, funkčné a temporálne vzťahy (obr. 6.1):

1) Priestorovo-štrukturálny rozmer zložitosti vystihujú najviac dve osi z Cadenassovho modelu: heterogenita ekologických prvkov v danom systéme a ich konektivita. Keďže štruktúra je ľahšie uchopiteľná a kvantifikovateľná ako správanie celku systému, na túto tému existujú viaceré štúdie využívajúce rôzne indikátory štrukturálnej komplexity (napr. ANDREASEN et al. 2001; v biológii napr. KARR 1991, 1998). V prípade štruktúry je tiež dôležité rozlišovať medzi jej vertikálnou zložkou (napr. fyzická výstavba vegetácie v lesnom alebo lúčnom ekosystéme) a medzi jej horizontálnou zložkou, často označovanou aj ako kompozícia systému (napr. druhová skladba a abundancia jednotlivých druhov).

V našich štúdiách sa sústreďujeme na hodnotenie horizontálnej zložky štrukturálnej zložitosti spoločenstiev cievnatých rastlín (napr. TURISOVÁ et al. 2016; SABO et al. 2017).

2) Ekologicko-funkčný rozmer zložitosti na makroskopickej úrovni pomerne dobre vystihuje napr. aj schopnosť spoločenstiev, ekosystémov a krajín zachytávať, transformovať, využiť a disipovať slnečnú

energiu (napr. KAY 2000; prehľad indexov a metodík podáva MAES et al. 2011). Význam tohto rozmeru komplexity a realizovateľnosť vhodných indikátorov indikujú aj naše vlastné experimenty, ktoré vychádzajú z meraní energetickej bilancie systému atmosféra – povrch ekosystému. Okrem iného tiež demonštrujú tézu, že čím je ekologický systém zložitejší (napr. čím ide o sukcesne vyššie štádium), tým bude vyššia jeho kapacita záchytu a disipácie slnečnej energie, a tým aj jej využitia (SABO et al. 2011a).

3) **Historicko-časový rozmer zložitosti** reflektuje tretiu os Cadenassovho modelu, reflektuje vysokú dynamiku neustále sa meniaceho ekologického systému, vrátane jeho krátkodobej aj dlhodobej histórie. V ekosystéme k nej patrí napríklad podiel, kompozícia, vzájomné prepojenia a význam reliktných plôšok (napr. posmršťových biotopov, SABO & TOPERCER 2012), v krajine zas napr. mozaika plôšok historickej krajinnej štruktúry a ich vplyvy na iné plôšky, ale aj na charakteristický vzhľad krajiny (JANČURA & BOHÁLOVÁ 2001). Pohyb pozdĺž tejto osi zložitosti je do istej miery analogický s predošlým modelom, avšak analýza interakcií medzi plôškami si vyžaduje brať do úvahy rôzne funkčne, priestorovo a časovo vzdialené štruktúry a procesy.

Obr. 6.1. Systémový trojrozmerný model ekologickej komplexity. Ekologicko-funkčný, priestorovo-štrukturálny a časový rozmer vystihujú zložitosť živého systému. *Schéma a foto*: (c) Peter Sabo, 2009.

Funkčná a štrukturálna, aj časová zložitosť ekologických systémov sú prepojené a vzájomne sa ovplyvňujú. Funkčnú komplexitu dobre vystihuje schopnosť systému disipovať slnečnú energiu (KAY 2000) aj priepustnosť trofických sietí z pohľadu tokov energie (ULANOWICZ et al. 2006). Štrukturálnu zložitosť definujú predovšetkým heterogenita a konektivita komponentov systému. ADAMI et al. (2000) hodnotia štrukturálnu komplexitu podľa veľkosti genetickej informácie obsiahnutej v genóme, iní uvažujú taxonomickú vzdialenosť medzi druhmi, čo zahŕňa koncepcia funkčnej diverzity (LEPŠ 2013).

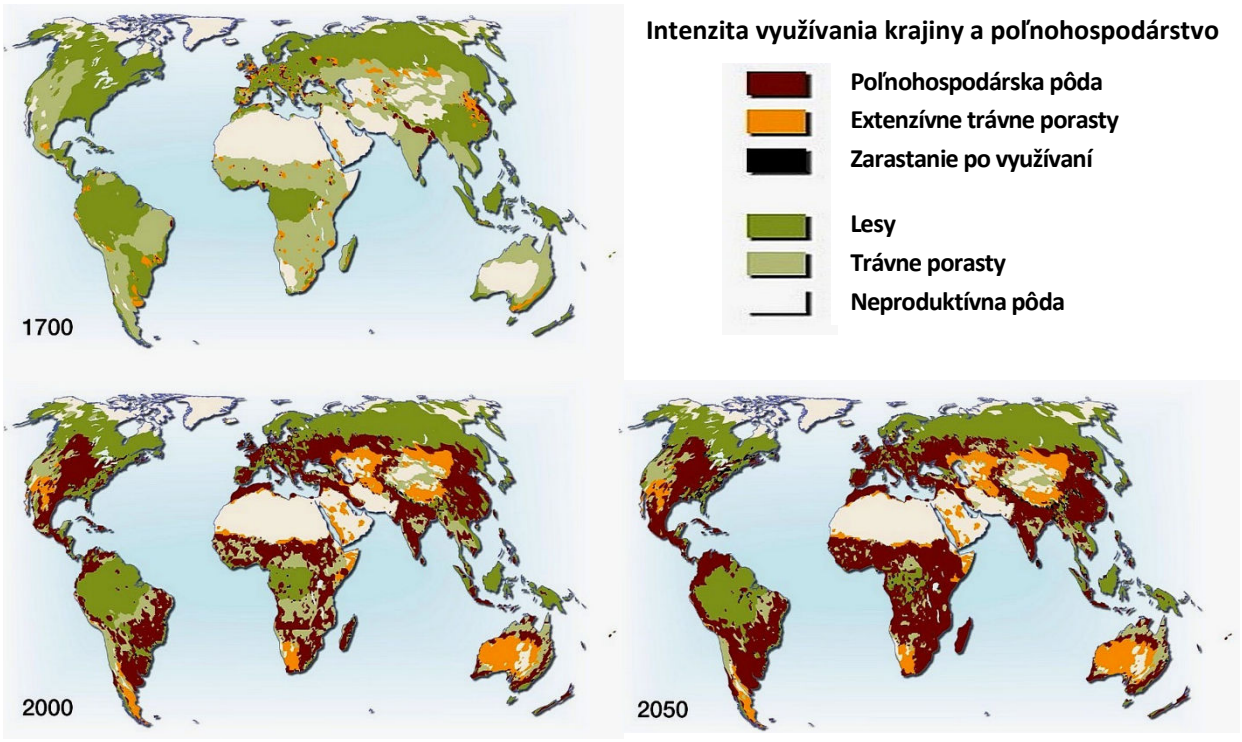
Ekologické hranice úbytku zložitosti populácií a metapopulácií, spoločenstiev a ekosystémov, krajín, ekoregiónov a zemského systému, po ktorých prekročení môže dôjsť k zásadným zmenám ich fyzickej štruktúry a správania je ťažké, niekedy až nemožné odhadnúť. O to viac je nutné **rešpektovať existujúcu zložitosť** ako predpoklad a základ zdravia týchto systémov: *„Rešpektovanie limitov, ktoré nám kladie zložitosť, môže byť zodpovednou cestou ako sa postaviť k nášmu svetu“* (CILLIERS et al. 2013).

6.1.2 Od ekologickej stability k nerovnovážnej perspektíve

Ochrana zložitosti a integrity ekologických systémov nutne zahŕňa ochranu fyzickej štruktúry systému, aj ochranu interakcií a procesov, ktoré vymedzujú stavový priestor správania systému, a v neposlednom rade tiež ochranu ich prírodných a kultúrnych dedičstiev. V tejto súvislosti je dôležité pripomenúť si význam informácií ako nenahraditeľného prírodného aj kultúrneho zdroja (kap. 2). Informácia je vždy kontextuálna a zložitý Zemský systém (ak doň zahrnieme aj človeka a jeho výtvory, potom v súčasnosti už ide o Zemský sociálno-ekologický systém) bez genetickej ale ani kultúrnej informácie už nemôže existovať. Kultúrna informácia, potrebná pre jeho fungovanie zahŕňa tradičné aj vedecké poznanie o prírodných zdrojoch, druhoch, biotopoch a ekosystémoch, ako aj o možnostiach ich

udržateľného využívania, ale napr. aj umenie – pokiaľ kultivuje vzťah človeka k prírode.

Ešte v nedávnej minulosti patrilo k premisám ekológie, že prírodné systémy sú alebo aspoň smerujú k určitej rovnováhe a iba vzácne sú narúšané vplyvmi z vonkajšieho prostredia (PLESNÍK 2010). Preto sa za cieľ manažmentu ekosystémov logicky považovalo udržanie ich ekologickej rovnováhy. O to viac, že význam tejto paradigmy ukotvil globálny nástup environmentálneho hnutia a záplava správ o rozsahu pretvárania zemského povrchu človekom, týkajúcich sa najmä zmien vo využívaní sídelnej, priemyselnej, ale aj lesnej a poľnohospodárskej krajiny (obr. 6.2.).



Obr. 6.2. Zmeny využívania krajiny a poľnohospodárstvo, projekcia zmien od roku 1700 do roku 2050. Kľúčovou úlohou v prevencii straty biodiverzity a ekosystémových služieb je limitovať „výmenný obchod" medzi ekonomickým rastom a biodiverzitou, to znamená znížiť tlak na ďalšie zábery pôdy pre poľnohospodárstvo na úkor biodiverzity, a to zvýšením produktivity poľnohospodárstva a celkovým efektívnejším využívaním krajiny. *Upravené podľa:* © UNEP / GRID-Arendal, kartograf Hugo Ahlenius. (In: The Environmental Food Crisis – The Environment´s Role in Averting Future Food Crisis, 2009). https://www.grida.no/resources/6820

Ekologická rovnováha (v zmysle homeostázy) znamená, že ekosystém, krajina, ekoregión a pod. sa nachádzajú v rovnovážnom stave alebo v cyklicky sa opakujúcej postupnosti niekoľkých kvázi-rovnovážnych stavov, pričom základným mechanizmom je záporná spätná väzba (kapitola 3.1.). Príkladom je vyrovnávanie jednoduchých disipatívnych štruktúr a procesov na oráčine zložitejšími štruktúrami a procesmi, ktoré prebiehajú v lesnej remízke, čím oživujú aj život na oráčine (napr. umožňujú hniezdenie pernatých dravcov, ktoré zalietavajú nad oráčinu a regulujú populácie hlodavcov).

Problém je, že podľa mnohých paleontologických výskumov **rovnovážny stav v ekosystémoch je skôr vzácny** (ROHDE 2006 in PLESNÍK 2010), v skutočnosti stabilné, nemeniace sa ekosystémy v prírode prakticky neexistujú. Nielen organizmy, ale aj ekologické systémy charakterizuje vysoká dynamika, pohyb po životnej trajektórii resp. zložité životné cykly (napr. cyklus lesa), ktorých súčasťou sú zmeny bilancií ich hmotných, energetických a informačných vstupov, ich tokov cez systém a výstupov. Zdá sa, že aj tak často skloňovaná ekologická stabilita je vlastne dôsledkom prirodzenej dynamiky prvkov nižších hierarchických úrovní.

Paradigma ekológie sa preto v súčasnosti mení a namiesto stability sa zdôrazňuje zložitosť ekologic-

kých systémov, ich dynamika a nelineárne správanie (PROULX 2007). V tomto pohľade ekologická rovnováha znamená, že ekosystémy sa rozvíjajú na báze spontánnych autoorganizačných procesov a súčasne prostredníctvom autoregulačných procesov dosiahnuté usporiadanie aj udržiavajú. Novým cieľom je udržať alebo obnoviť ekologickú integritu (PLESNÍK 2010), a nástrojom k tomu má byť posilnenie prirodzenej štruktúry spoločenstiev a prirodzenej dynamiky biologických a ekologických procesov.

Ekologická stabilita

Ekologická stabilita bola v strednej Európe aj na Slovensku koncom 80. a začiatkom 90. rokov definovaná ako schopnosť, kapacita ekologických systémov vlastnými silami, bez intervencií človeka *„vyrovnávať vonkajšie rušivé vplyvy“,* t.j. čeliť tlakom z okolia systému *a „uchovávať a reprodukovať svoje podstatné charakteristiky“*, t.j. kľúčové vlastnosti, ktoré daný systém charakterizujú. (Nakoľko „*ekologická stabilita*“ vyvoláva predstavu niečoho nemenného a stáleho, za vhodnejší termín považujeme „*ekologickú rovnováhu*“.)

Jednoduchá kvantifikácia koeficientu ekologickej stability krajiny sa počíta ako aritmetický priemer ekologickej významnosti jednotlivých krajinných prvkov: $K_{es} = \Sigma_{i=1,s} (k_{pi} * p_i) / P$, kde k_{pi} je koeficient ekologickej významnosti i-teho krajinného prvku, p_i je plocha, ktorú zaberá a P je celková rozloha hodnotenej krajiny. Rozlišuje sa niekoľko zdrojov tejto stability (ktoré zodpovedajú emergentným vlastnostiam), najmä tieto dve:

Ekologická odolnosť (ekologická rezistencia) vyjadruje schopnosť ekosystému resp. spoločenstva ako celku svojimi vlastnými autoregulačnými mechanizmami pretrvávať a reprodukovať svoje podstatné charakteristiky aj v podmienkach narušenia zvonku (do určitej miery narušenia).

Ekologická pružnosť (ekologická reziliencia) vyjadruje schopnosť ekosystému resp. spoločenstva vrátiť sa do stavu svojej dynamickej rovnováhy po odoznení narušenia, ktoré zmenu ekosystému vyvolalo. Všeobecne sa považuje za kritický faktor určujúci schopnosť ekologickej stability.

Napriek tomu, že termín ekologická stabilita sa používa aj v legislatíve ochrany prírody a pri posudzovaní vplyvov na životné prostredie, vhodnejším termínom je ekologická rovnováha. Táto vzniká vzájomne vyváženým pôsobením dynamiky nižších hierarchických úrovní a úzko súvisí s ekologickou integritou.

Upravené podľa: MIKLÓS 1992; BUČEK et al. 1996; MÍCHAL 1994; ČABOUN 1997; VLADOVIČ 2003; VOLOŠČUK 2001

Nerovnovážna perspektíva

K novým trendom systémovej ekológie patrí aj **koncepcia dynamickej nerovnováhy ekosystému**, ktorá v priebehu jeho životného cyklu dokonca prevažuje. Ekosystémy totiž nie sú uzavreté systémy, izolované od svojho okolia, ale intenzívne si s ním vymieňajú energiu, hmotu a informácie. Ich dynamiku ovplyvňuje synergické pôsobenie vysokého počtu vnútorných aj vonkajších väzieb a faktorov a opísať túto nelineárnu dynamiku a prognózovať vývoj ekosystému je obtiažne (PARROTT 2002, 2010).

Rovnovážny stav ekosystému je preto skôr vzácny a časovo obmedzený (PLESNÍK 2010). Navyše spravidla neexistuje jeden rovnovážny stav ekosystému, skôr dynamická postupnosť kvázi-rovnovážnych stavov. Túto dynamiku a trend zvyšovania zložitosti organizácie ekosystému môžeme pozorovať napr. v priebehu ekologickej sukcesie, ale aj pri štúdiu biologickej evolúcie. Rast komplexity počas evolúcie je výraznejší v stabilnom prostredí (ADAMI et al. 2000). V nerovnovážnej perspektíve je **podstatou homeostázy celku neustála vysoká dynamika** jeho komponentov, neustále zmeny tokov energie, hmoty a informácií v malých plôškach. Táto dynamika v kombinácii s druhým termodynamickým zákonom spôsobuje, že sukcesný vývoj aj evolučný vývoj majú svoje zákonitosti, pričom sa synergicky uplatňujú tak náhodné (stochastické) až chaotické procesy, ako aj deterministické procesy.

K významným ekologickým pravidlám tu patria aj zoskupovacie pravidlá (*assembly rules*), ktoré určujú proces **výberu najoptimálnejšej kombinácie druhov** v každom bode vývojovej trajektórie ekosystému. Čiastočne to demonštruje aj evolučná konvergencia živých systémov v podobných prostrediach. Napríklad ekosystémy severnej a južnej pologule majú pri rovnakom prísune slnečného žiarenia (v rovnakých zemepisných šírkach a pri podobných zrážkových pomeroch) relatívne podobné druhové zloženie a zložitosť, aj napriek tomu, že ich obývajú úplne iné druhy (SALTHE 2005).

Prúdiaca mozaika biotopov

Vysokú dynamiku prírody vystihuje **metafora prúdiacej mozaiky biotopov**, ako neustále plynulo sa meniacej mozaiky biotopov v dôsledku abiotických, biotických aj antropogénnych krajinotvorných činiteľov, pričom sa uplatňujú tak deterministické, ako aj náhodné (stochastické) procesy (PLESNÍK 2010). Táto metafora však platí iba pre prírodnú, prípadne poloprírodnú krajinu krajinu.

Jednotlivé druhy sú v spoločenstvách a ekosystémoch prepojené rôzne silnými a rôzne početnými **interakciami, ktoré sa podieľajú aj na ich evolúcii**: *„Druhy si predstavme ako „atómy", ktoré sa združujú do ekologických „molekúl", t.j. do funkčných skupín tvoriacich základ ekosystémových procesov. Podľa podmienok v ekosystéme sa potom vytvárajú viac či menej trvanlivé útvary organizmov rôznej sily a „s rôznym znamienkom". Pritom každá zmena môže spustiť kaskádu nových reakcií, ktoré povedú k trochu odlišnému usporiadaniu.*" (PLESNÍK & VAČKÁŘ 2005).

Ukazuje sa, že kombinácia existencie pevných biologických a priestorových pravidelností a náhodnosti je kľúčom k vývoji aj pretrvávania živých systémov „na hrane chaosu" (PARROTT 2010) – rastu a evolúcie organizmov a ekosystémov, ich dočasného pretrvávania v stave ekologickej rovnováhy, aj narušení ich životných trajektórií a cyklov zásahmi zvonku (disturbanciami). Tieto narušenia sa v súčasnom ponímaní už nepovažujú za niečo neželené, ale za dôležitú súčasť prirodzeného vývoja ekosystému. Ekosystémový prístup pri manažmente chránených území preto musí brať do úvahy aj význam prirodzených prírodných disturbancií, keďže tieto sa podieľajú nielen na udržiavaní heterogénnej a premenlivej mozaiky biotopov v krajine, ale podmieňujú aj integritu zložitých systémov (PLESNÍK 2018).

Ako však reagovať na túto vysokú zložitosť už nielen fyzickej štruktúry, ale aj správania ekologických systémov, ktoré sa neustále menia a reorganizujú? Ak udržať ekologickú stabilitu, ale aj dlhodobú ekologickú rovnováhu je nemožné, o čo sa môžeme oprieť pri úsilí o udržateľné využívanie biotických prírodných zdrojov a vhodný manažment chránených území a ich ekosystémov?

6.1.3 Ekologická integrita

Odpoveďou na vysokú a naším intelektom do detailov neuchopiteľnú zložitosť a vysokú dynamiku ekologických systémov je **systémová až holistická koncepcia ekologickej integrity (EI)**. V prípade týchto systémov totiž už jednoduché koncepcie a riešenia nepostačujú. Koncepcia EI pritom nie je až taká nová, uvedený pojem používal už v prvej polovici minulého storočia americký lesník a ekológ Aldo Leopold (1887 – 1948): "*Správna je taká vec, ktorá pomáha zachovať integritu, stabilitu a krásu biotického spoločenstva. Zlé je všetko, čo vedie k opaku*." (LEOPOLD 1999).

Z Leopoldovho odkazu vyplýva, že to, čo je na živej prírode fascinujúce, nie je iba vysoká biologická rozmanitosť (biodiverzita), ale aj vysoká koherencia prejavujúca sa v určitej synchronizácii početných biologických a ekologických procesov, prostredníctvom ktorej

sa vyrovnáva stochasticita (náhodnosť) mnohých iných procesov a zabezpečuje sa celistvosť a funkčnosť celku – od organel a živých buniek cez pletivá a tkanivá, orgány a ich sústavy, organizmy a miestne populácie druhov, spoločenstvá, ekosystémy a ekoregióny, vrcholiac najvyšším – Zemským ekologickým systémom (správnejšie Zemským sociálno-ekologickým systémom). Výhodou koncepcie EI oproti staršej koncepcii ekologickej stability je, že uvažuje aj vysokú dynamiku ekologického systému a preto pripúšťa aj jeho zmenu a reorganizáciu. Aj napriek nej si však integrovaný systém zachováva svoju identitu, štruktúru, kompozíciu a funkcie (WURTZEBACH & SCHULTZ 2016).

Integrita ekologických ekosystémov

Podľa Cambridgského výkladového slovníka pojem integrita označuje kvalitu byť celkom, byť úplným a odolným voči zmenám (CAMBRIDGE 2019). **Ekologická integrita (EI) vyjadruje celistvosť, úplnosť, kvalitu aj rezilienciu ekologického systému** (KAY 1993), teda aj mieru jeho neporušenosti, autenticity,

funkčnosti a reziliencie. Ide o schopnosť systému fungovať spontánne na báze pôvodných autoorganizačných a autoregulačných mechanizmov, pri súčasnom zachovaní štruktúry, kompozície, funkčnosti a prirodzenej úrovne jeho zložitosti, pri ktorej je aj jeho vitalita, funkčnosť a reziliencia najvyššia.

Tri významné prejavy ekologickej integrity vysvetľujú WURTZEBACH & SCHULTZ (2016) nasledovne:

- **Štruktúra** tu označuje fyzickú štruktúru systému, napr. vertikálnu výstavbu vegetácie, horizontálny zápoj drevín v lesnom ekosystéme alebo veľkosť a priestorové usporiadanie jednotlivých krajinných prvkov v krajinnej mozaike.
- **Kompozícia** v prípade ekosystému vyjadruje najmä druhové zloženie a abundanciu jednotlivých druhov alebo v prípade krajiny diverzitu a abundanciu jednotlivých typov krajinných prvkov (napr. v porovnaní s mapami historickej krajinnej štruktúry).
- **Funkčnosť** vyjadruje poskytovanie funkcií a udržiavanie charakteristických vlastností ekologického systému. V ekosystéme to zahŕňa napr. dynamiku miestnych populácií, ako aj vnútrodruhové a medzidruhové interakcie (napr. konkurenciu, ale aj mutualizmus, herbivoriu, predáciu), ako aj abiotické procesy, najmä toky neživej hmoty a energie medzi susediacimi ekosystémami. Iba funkčný ekosystém a funkčná krajina dokážu človeku poskytovať široké spektrum ekosystémových služieb nevyhnutných pre našu existenciu a súčasne odolávať tlakom a zmenám vonkajšieho prostredia.

Môžeme zhrnúť, že kým biologická a ekologická komplexita označujú zložitosť usporiadania (štruktúry aj správania), pojmy biologická a ekologická integrita vyjadrujú **neporušenosť, úplnosť a autenticitu, teda aj pôvodnosť resp. prirodzenosť a identitu usporiadania živého systému** (táto je obrazom pôvodnosti resp. prirodzenosti štruktúry aj správania tohto systému). Vysokú funkčnú zložitosť môže mať napr. aj park s vysokou diverzitou drevín, o jeho integrite však nevypovedá iba schopnosť zachytávať, využívať a disipovať slnečnú energiu, ale aj miera jeho autenticity, to znamená pôvodnosti resp. prirodzenosti druhovej skladby organizmov, táto v parku môže byť nízka aj vysoká. Inverziou EI ekologického systému je miera jeho narušenia (najmä antropogénneho).

Koncepcia EI sa intenzívne rozpracúva najmä počas posledného štvrťstoročia (pozri napr. SCHNEIDER & KAY 1994; KAY 2000; PIMENTEL et al. 2000). WESTRA & LEMONS (2007) považujú za k nej relevantné témy predovšetkým fungovanie systémov divočiny, autopoiézu živých systémov, ich dynamiku a ich rytmy, hierarchiu ekosystémov, ich význam pre podporu života na Zemi a ďalšie. Podľa Jamesa Kaya *„ekosystém má integritu ak zachováva svoju komplexitu a kapacitu pre autoorganizáciu a dostatočnú diverzitu v rámci jeho štruktúr a funkcií, za účelom udržania autoorganizujúcej sa komplexity ekosystému v čase“* (KAY 1993). Vzhľadom k hierarchickej organizácii zložitých ekologických systémov tiež platí, že EI na danej úrovni vždy závisí aj od kontextu hierarchicky vyššieho systému.

Niektoré vzájomne sa dopĺňajúce prístupy k definovaniu a hodnoteniu ekologickej integrity

Divočinovo-normatívny odvodzuje EI od ekosystémov nenarušenej divočiny, čím je daný ekosystém bližšie jeho prírodnému vzoru, tým bude mať vyššiu integritu. K základným otázkam patrí aký podiel krajiny resp. kontinentu máme ponechať divočine, aby sme udržali ich integritu.

Systémovo-normatívny opisuje ekosystémy ako dynamické autoorganizujúce sa systémy, rezistenné a rezilientné voči stresu a súčasne schopné evolučného vývoja. Podľa tohto prístupu je potrebné porozumieť štruktúre a procesom prebiehajúcim v systéme a udržať prirodzený evolučný proces.

Ekosystémovo-pluralistický rozširuje pôvodnú koncepciu EI aj o rozmanité sociálne záujmy, reflektujúc oprávnené potreby a záujmy človeka. Predmetom štúdia sú tu sociálno-ekologické systémy, ktoré integrujú prírodné (resp. poloprírodné) a socio-ekonomické komponenty súčasného sveta.

Transpersonálne-spolupracujúci rozširuje riešenie krízy o reflexiu postojov k prírode a krajine, ktoré presahujú úzke osobné alebo skupinové záujmy a vedú k rešpektovaniu potrieb mimoľudských organizmou a k identifikácii sa s krajinou.

Upravené podľa: MANUEL-NAVARRETE et al. 2004

Všeobecne akceptovaná definícia ekologickej integrity (EI) však zatiaľ neexistuje. PLESNÍK (2010) ju považuje za syntetickú vlastnosť ekosystému, ktorý spontánne udržiava prirodzené druhové zloženie a vzťahy medzi organizmami. LEO & LEVIN (1997), ULANOWICZ (1997, 1999), SABO (2007) a ďalší ju vnímajú najmä ako **mieru pôvodnosti a nenarušenia ekologického systému** v širokom rozsahu jeho atribútov, optimálnosti jeho vnútornej organizácie a tým aj jeho vitality, funkčnosti a reziliencie. Ekologicky vysoko integrovaný systém spravidla vykazuje aj vyššiu rezistenciu a reziliencu voči disturbančným vplyvom okolia.

Neporušenosť ekologického systému tu znamená **absenciu takej úrovne stresu** (napr. v dôsledku znečistenia, depozície kyslých zrážok, nadmerného lovu a zberu, nástupu inváznych nepôvodných druhov rastlín a pod.) ktorý by ekosystém poškodzoval. Podľa ANDREASENA et al. (2001), ekologická integrita zahŕňa prirodzenosť druhového zloženia a udržateľnosť systému. Vidíme, že koncepcia ekologickej integrity je širšia ako koncepcia ekologickej stability, pretože v sebe zahŕňa aj dynamiku ekologického systému. V neposlednom rade je jej **vyjadrením je aj krása** – čo je ekologicky integrované, spravidla je aj krásne.

Aplikácia kocepcie EI pri ochrane vody, lesov a národných parkov

Pojem biologickej a ekologickej integrity sa dostal do zákona USA o vode už v roku 1972 (*Clean Water Act*) a do **zákona Kanady o jej národných parkoch** v roku 1988 (*Parks Canada Act*), kde znamená udržanie resp. obnovu podmienok charakteristických pre daný prírodný región – od abiotických podmienok cez štruktúru a kompozíciu biologických spoločenstiev až po udržanie prírodných procesov a tým aj funkcií ekosystémov chráneného územia (ECCC 2017). Koncepciu ekologickej integrity využíva aj Lesná služba USA (*US Forest Service*) pri hodnotení, územnom plánovaní a monitoringu stavu lesných ekosystémov.

V národných parkoch Kanady a USA sa udržanie a obnova ekologickej integrity prírodných území stali novým cieľom manažmentu týchto chránených území, ktorých sústava vedie k EI vtedy, ak „*podporuje kompozíciu prírodných ekosystémov, ich štruktúru a funkcie, ako aj ich kapacitu pre sebaobnovu*“ (BC Parks 2012). Koncepcia EI sa tu premieta aj do monitorovacích programov správ národných parkov resp. aj do programov obnovy poškodených ekosystémov. Zdôrazňuje tiež význam prírodných disturbancií pre dlhodobé udržanie štruktúry, druhovej skladby a fungovania ekosystému, nakoľko tieto paradoxne posilňujú jeho reziliencu voči budúcim disturbanciám.

Ekologicky integrované ekosystémy chráneného územia sa vyznačujú tým, že si udržiavajú pôvodné druhové zloženie, populácie pôvodných druhov prosperujú, trofická štruktúra ekosystémov nie je narušená, biologické spoločenstvá sú rôznoveké a vyznačujú sa prirodzenou biodiverzitou, ďalej produktivita ekosystémov, rýchlosť dekompozície detritu a cykly biogeochemických prvkov sú v rámci ich optimálneho rozsahu resp. v medziach akceptovateľných limitov (WOODLEY 2010).

Ekologická integrita ako inverzia vzdialenosti ekosystému k normatívu divočiny

Dimenzie integrity ekologického systému kopírujú dimenzie jeho zložitosti. Indikátorom EI sú vzdialenosti charakteristík hodnoteného systému k tým hodnotám, ktoré reprezentujú prirodzenú (optimálnu) **zložitosť, osobitne štruktúru, kompozíciu a funkčnosť** (WURTZEBACH & SCHULTZ 2016) referenčného prírodného ekosystému. Čím budú charakteristiky dvoch porovnávaných ekosystémov rozdielnejšie, tým bud ich pomyselná **„ekologická vzdialenosť“** (*ecological distance*, FAITH et al. 1987) vyššia. To znamená, že v prípade ekosystému, ktorého kompozícia (druhové zloženie a abundancie druhov), dynamika (správanie) a funkcie sú bližšie k referenčnému ekosystému, potom bude ich „ekologická vzdialenosť“ menšia, čo znamená, že ekologická integrita hodnoteného ekosystému bude vyššia.

Dôležité je určiť, čo je možné považovať za takéto referenčné ekosystémy. Vhodnými sa javia prírodné, ale aj poloprírodné historické ekosystémy (napr. druhovo bohaté kosné lúky, vodné toky, líniové porasty drevín a remízky v poľnohospodárskej krajine). Integrita spoločenstva, ekosystému alebo krajiny v tomto ponímaní vyjadruje **mieru autenticity** fyzickej štruktúry (napr. spomínanej vertikálnej štruktúry porastov ekosystému), kompozície (druhovej skladby jednotlivých prvkov systému, ich zastúpenia a priestorového rozloženia) a funkčnosti (pôvodnosti prebiehajúcich procesov a správania

celku, vrátane jeho historickej dynamiky v daných ekologických podmienkach). V tzv. **divočinovo-normatívnom prístupe** k referenčným ekologickým systémom patria predovšetkým charakteristiky pôvodných prírodných ekosystémov, tzv. divočiny (*wilderness*, MANUEL-NAVARRETE et al. 2004).

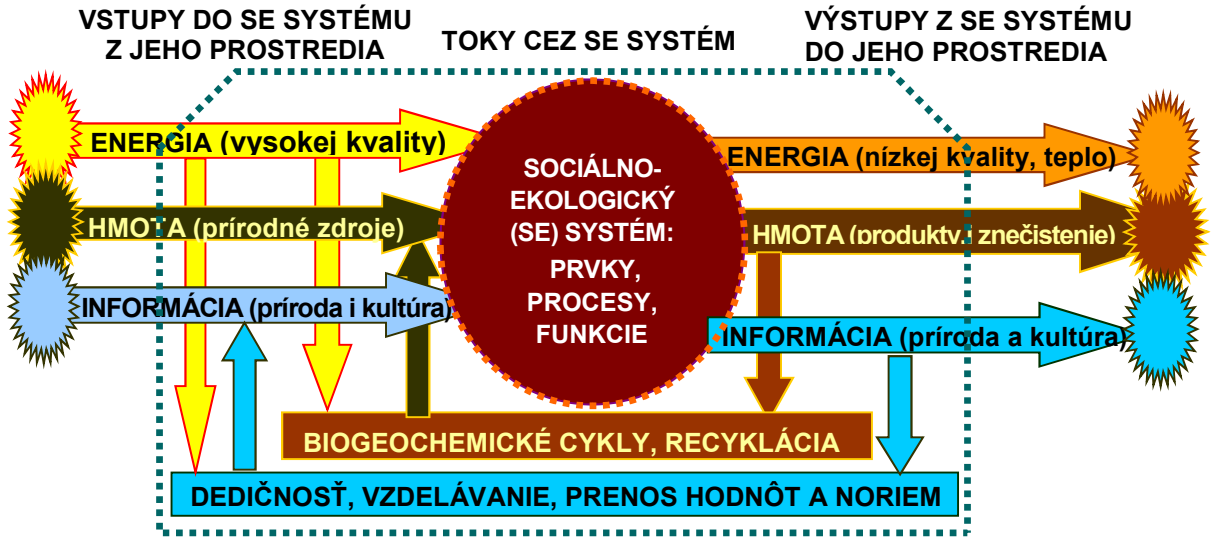
Ekologická integrita si teda vyžaduje zachovať **prirodzenú diverzitu a abundanciu jednotlivých typov prvkov** (napr. druhov v spoločenstve, plôšok v krajine) a prirodzených interakcií prvkov vnútri ekologického systému, ako aj medzi rôznymi úrovňami hierarchie. V prípade divočinovo-normatívneho prístupu je tiež dôležitá teória, že s rastom pôvodnosti a prirodzenosti štruktúry, kompozície a funkčnosti ekosystému sa súčasne zvyšuje aj jeho reziliencia voči prírodným narušeniam (WOODLEY 2010).

Otázkam praktického hodnotenia ekologickej komplexity a integrity sme sa venovali vo viacerých experimentálnych výskumných štúdiách (napr. SABO et al. 2011a; SABO & REPISKÝ 2013; SABO & ŠKODOVÁ 2016; SABO et al. 2017). Jednu z nich priblížime v poslednej kapitole tohto dielu úvodu do systémovej ekológie.

Prírodný kapitál z pohľadu ekologickej integrity

Pojem prírodný kapitál, **existenčný pilier ľudskej civilizácie,** sme vysvetlili v kapitole 3. Pripomeňme si, že zahŕňa všetky hmotné, energetické, informačné a priestorové zdroje využívané ľudskou spoločnosťou. Jeho súčasťou nie sú iba hmotné objekty, energia a genetická informácia, ale aj široké spektrum emergentných vlastností a funkcií ekosystémov, ktoré ľudská spoločnosť využíva ako ekosystémové služby. Podmienkou ich zachovania je aj ochrana ekologickej komplexity a integrity systémov.

V tejto súvislosti je dôležité, že súčasťou prírodného kapitálu je aj ekologická zložitosť a integrita. Prosperita ľudskej spoločnosti preto závisí aj od udržania prirodzenej zložitosti a integrity ekologických systémov, ktorých degradáciu skôr či neskôr nutne sprevádza aj dezintegrácia sociálnych a ekonomických systémov. Integráciou prírodných a socioekonomických systémov vznikajú hierarchicky vyššie **sociálno-ekologické systémy** (obr. 6.3, viac v kapitole 7.1). Zachovanie prírodného kapitálu si vyžaduje nielen chrániť prírodné objekty (organizmy, druhy, biotopy a ekosystémy), ale **dôležité je porozumieť aj princípom organizácie prírodných systémov** a udržať pôvodné interakcie a ekologické procesy, ktoré tieto objekty integrujú do zložitých a hierarchicky organizovaných autopoietických sietí.



Obr. 6.3. Zjednodušený náčrt tokov energie, hmoty a informácie v sociálno-ekologickom systéme, jeho nevyhnutnou súčasťou sú aj rozmanité cykly hmoty a informácie. Takýto systém je čiastočne organizačne uzavretý, ale súčasne je otvorený pre výmenu energie, hmoty a informácie s jeho vonkajším prostredím. *Schéma:* Peter Sabo, 2019, *Námet podľa:* MILLER 2005 (fig. 3-3), MILLER & SPOOLMAN 2011 (fig. 2-17).

Keďže práve interakcie a procesy sú zdrojom zložitosti správania sa ekologického systému a jeho emergentných vlastností, potom udržanie ekologickej integrity je základom potenciálu ďalšieho vývoja, ale aj homeostázy ekologického systému. Týmto sa chránia aj jednotlivé prírodné objekty. V prípade, ak uplatníme

ekosystémovo-pluralistický prístup (MANUEL-NAVARRETE et al. 2004), ktorý vedie k syntéze prírodných a socio-ekonomických systémov do sociálno-ekologického systému, musíme súbežne okrem zachovania ekologickej integrity riešiť aj otázky zachovania sociálnej integrity spoločnosti a chodu ekonomiky (obr. 6.3).

Podľa autorov **koncepcie prírodného kapitalizmu** finančné ocenenie všetkých prírodných zdrojov a ekosystémových služieb umožní vytvoriť obehovú ekonomiku, v ktorej sa rádovo zvýši efektívnosť využívania prírodných zdrojov a v materiálovo uzavretých systémoch sa zamedzí produkcii odpadov, ktorá nelikviduje prírodný kapitál, ale investuje do jeho udržania a obnovy (LOVINS et al. 2006). Takáto ekonomika bude tiež musieť riešiť súčasný zle nastavený obchodný systém a iné.

Kritici tohto prístupu však poukazujú na fakt, že nie všetky prírodné prvky a javy je možné previesť do účtovníckych schém, pretože napr. život udržiavajúce systémy Zeme majú pre ľudstvo existenčnú hodnotu a o ich budúcnosti sa preto nemôžeme dohadovať v trhovom prostredí.

6.2 Nerovnovážna termodynamika živých systémov

Ako sme uviedli v kap. 2, druhý termodynamický zákon hovorí, že pri zmene energie z jednej formy na druhú vždy dochádza k degradácii časti tejto energie na menej kvalitnú, rozptýlenú a tým menej užitočnú. V prípade úplne uzavretých systémov pri každej transformácii energie rastie ich entropia. To znamená, usporiadanosť takýchto systémov sa znižuje, až sa postupne rozpadne. Paradoxne, **živé systémy charakterizujú vysoko usporiadané štruktúry aj do istej miery usporiadané správanie v čase** (a to aj napriek tomu, že jeho súčasťou sú aj obdobia nestability resp. chaosu).

Tento zdanlivý rozpor vo vzťahu k druhému termodynamickému zákonu vysvetľuje termodynamická teória živých systémov, podľa ktorej je základom vývoja zložitých systémov existencia energetických gradientov. Jej základy pred 70 rokmi položil **Erwin Schrödinger** (1887 – 1961), nositeľ Nobelovej ceny za fyziku a rozvinul ich ďalší nositeľ Nobelovej ceny (za chémiu) – **Ilya Prigogine** (1917 – 2003). Z ich prác vychádzajú ďalší autori, ktorí sa snažia vysvetliť tajomstvo vzniku života a jeho rozmanitosť.

6.2.1 Termodynamická teória života a vývoja jeho zložitosti

Čo je to život ?

Napriek tomu, že intuitívne všetci vnímame, čo je to život (k živým organizmom sa zvykli zaraďovať mikroorganizmy, rastliny, huby a živočíchy, dnešný intenzívny genetický výskum však aj túto tradičnú schému výrazne mení, ADL et al. 2012), vieme rozlišovať medzi živým a neživým, presne definovať život, nie je až také jednoduché, čo dokumentuje aj množstvo jeho rôznych definícií. (K novým otázkam napr. patrí: bol vznik života nevyhnutný pri raste zložitosti organizácie hmoty?) Vedci sa preto snažia definovať najmä vlastnosti života, prejavy živého systému, ktorými ho je možné odlíšiť od neživých prvkov a procesov. Patria k nim predovšetkým tieto vlastnosti (*upravené podľa:* STARR et al. 2013):

- vytváranie a využívanie organických zlúčenín na budovanie štruktúr a riadenie procesov,
- transformovanie a aktívne využívanie energie v procesoch fotosyntézy a metabolizmu,
- udržiavanie vnútorného prostredia prostredníctvom homeostatických mechanizmov,
- rast, vývoj k dospelosti (dozrievanie) a starnutie, smrť alebo rozpad,
- reprodukcia spočívajúca v prenose genetickej informácie na potomkov ale aj v cykloch lesa,
- schopnosť adaptácií k zmenám prostredia a súčasne schopnosť meniť svoje prostredie.

Život charakterizujú viaceré vzájomne sa doplňujúce aspekty, preto, ako upozorňuje POLOUČEK (2018), každá zmysluplná definícia musí zahŕňať všetky živé entity, ich vzájomné vzťahy, ako aj ich evolúciu. Podľa neho *„život je v časopriestore súvislá entita hmotných štruktúr a ich interakcií, ktorá samovoľne smeruje k rastu v sebe obsiahnutej hmoty a k poklesu jej entropie na úkor (hmoty a entropie)*

svojho okolia“. Ani tento novodobý pokus definovať život však nie je úplný, pretože nezahŕňa nevyhnutnosť prísunu energie, bez ktorej by hmota sama osebe samovoľne nikam smerovať nedokázala. Navyše definícia hovorí iba o raste hmotnej entity a nezahŕňa postupnú kvalitatívnu premenu organizácie živej hmoty, ktorá charakterizuje celý priebeh evolúcie.

Definícia života preto musí zahŕňať nielen jeho hmotné, ale aj energetické a informačné aspekty. Na termodynamické aspekty vzniku a vývoja živých systémov medzi prvými už v roku 1943 upozornil Erwin Schrödinger v štúdii **„Čo je život?“** (SCHRÖDINGER 1944). Podľa neho väčšina fyzikálnych zákonov na makroúrovni platí v dôsledku chaosu, ktorý vládne na malých úrovniach (príkladom je difúzia – chaotický pohyb atómov, iónov a molekúl z miesta ich vysokej koncentrácie do miesta ich nízkej koncentrácie). Usporiadanie tu vzniká z neusporiadania. Aplikáciou fyzikálnych princípov aj na živé systémy zdôraznil dva hlavné princípy: život znamená „*vznik usporiadania z usporiad*ania“ (čo je zjavné napr. pri rozmnožovaní organizmov), ale súčasne zahŕňa aj „*vznik usporiadania z neusporiadania“* (napr. keď rastliny vytvárajú vysoko usporiadané štruktúry, pričom okrem energie a genetickej informácie využívajú aj „*neusporiadané molekuly*“ z pôdy a atmosféry, SCHNEIDER & KAY 1994).

Schrödinger vychádzal z druhého termodynamického zákona, tvrdiac, že všetky živé systémy (napriek tomu, že sú organizačne pomerne uzavreté) existujú iba vo svete tokov energie a hmoty. Práve import energie do takéhoto systému mu umožňuje vytvárať a udržiavať organizovanejšie štruktúry a správanie, a to za cenu exportu nimi generovanej entropie do okolia. K prejavom života patrí nielen evolúcia nových stavebných prvkov hmoty, ale aj nových procesov.

CAPRA (1997) tiež skúmal kritériá života, pričom sa pokúsil o syntézu dvoch prístupov – štúdie usporiadania (formy, organizácie, kvality) a štúdie fyzickej stavby (látky, hmoty, kvantity). Zdôraznil, že k poznaniu systému nestačí analýza jeho prvkov (vysvetľuje to na príklade súčiastok bicykla), ale potrebujeme poznať aj ich vzťahy (napr. ako jednotlivé súčiastky usporiadať do funkčného celku bicykla).

Za tri hlavné kritériá živých systémov považuje (CAPRA 1997):

1) ich usporiadanie (organizáciu) – konfiguráciu vzťahov, ktoré definujú vlastnosti systému;
2) ich stavbu (výstavbu) – konkrétnu fyzickú štruktúru, realizáciu usporiadania systému;
3) životný proces – aktivity spojené s neustálym preusporiadávaním systému.

Prístupov ku kritériám života je samozrejme viac, širšie ponímanie živých systémov, zahŕňajúce medzi ne aj ekologické systémy (aj keď nie v zmysle superorganizmu) zdôrazňuje **význam metabolizmu** (látkovej premeny) ako súčasti transformácií energie v živom systéme.

Nerovnovážna termodynamika, disipatívne štruktúry a disipatívne procesy

Nositeľ Nobelovej ceny za chémiu (1977) belgický fyzik a chemik ruského pôvodu Ilya Prigogine pri štúdiu zložitých systémov zistil, že výsledkom transformácií energie vstupujúcej do systému otvoreného pre toky energie a hmoty sú nové štruktúry a procesy, v dôsledku ktorých sa zvyšuje vnútorné usporiadanie systému, nakoľko entropiu systém exportuje do svojho okolia. Keďže tieto systémy vytvárajú a udržiavajú svoje usporiadanie prostredníctvom disipácie energie, ich štruktúry sa nazývajú **disipatívne štruktúry**, kým transformácie energie **disipatívne procesy**. (PRIGOGINE & STENGERS 1984, IVANIČKA 1997)

Podľa Prigogina v termodynamicky otvorených systémoch sa v dôsledku prísunu energie objavuje spontánna autoorganizačná aktivita, ktorú nazýva **disipatívna organizácia**. Disipatívne štruktúry predstavujú fyzickú stavbu, prvky a väzby termodynamicky otvorených systémov, ktoré sú vychýlené zo stavu termodynamickej rovnováhy tokmi vysokokvalitnej energie a spontánne vytvárajú a udržiavajú svoje usporiadanie využívaním a disipáciou tejto energie, pričom do svojho okolia exportujú menej kvalitnú, rozptýlenú (t.j. disipovanú) energiu, čím zvyšujú jeho entropiu (NAVEH 1987; PRIGOGINE & STENGERS 1984).

Pri pokračujúcom prísune vysokokvalitnej energie (s vysokou exergiou) sa tieto štruktúry spontánne vyvíjajú smerom k ešte zložitejšiemu usporiadaniu. Čím je prísun energie vyšší, tým viac práce musí systém vykonať aby sa s energetickým gradientom vyrovnal a preto sú dispatívne štruktúry zložitejšie.

Na nich realizované procesy využívajú voľnú energiu a transformujú ju na energiu nižšej kvality (s nižšou exergiou), preto sa nazývajú disipatívne procesy. Týmto spôsobom prvky systému a ich interakcie formujú správanie. Podmienkou vzniku a vývoja takýchto štruktúr sú toky energie, hmoty a informácie do systému – v istom rozmedzí týchto tokov sú tieto štruktúry pomerne stabilné (SCHNEIDER & KAY 1994).

Základom vzniku disipatívnych štruktúr a disipatívnych procesov je prísun energie do systému, ktorý v konečnom dôsledku vedie k tvorbe a rozvoju autiopoietických sietí systému. Sú nimi nielen biologické a ekologické systémy, ale napr. aj globálna cirkulácia ovzdušia, morské prúdy, cyklóny a anticyklóny. Ich vzájomné interakcie vytvárajú zložitý globálny klimatický systém, ktorý distribuuje prebytok energie z oblasti trópov smerom k pólom a na pevninu prináša vlahu z oceánov.

Disipatívne štruktúry a procesy v systéme globálnej atmosférickej cirkulácie

Nerovnovážna termodynamika klimatického systému spočíva v prekonávaní teplotného gradientu medzi slnkom ohriatym zemským povrchom a podstatne chladnejšou atmosférou prostredníctvom troch základných procesov: vyžarovaním tepla (radiácia dlhovlnného IR žiarenia zemským povrchom), kondukcie tepla (výmenou kinetickej energie medzi molekulami vzduchu) a konvekcie tepla, jeho šírenia pohybom hmoty (vzduchu a vody) o rôznej teplote. V dôsledku vysokého skupenského tepla vody sa veľké množstvo energie spotrebuje a uvoľňuje práve pri zmenách jej skupenstva, preto je voda dobrým médiom prenosu energie konvekciou. Teplo, ktoré sa šíri kondukciou a spôsobuje zmenu teploty objektu, napr. prenos z teplejšieho zemského povrchu smerom k chladnejšej atmosfére, sa nazýva citeľné teplo.

Klimatický systém Zeme sa musí vyrovnávať aj s výrazným teplotným gradientom medzi rovníkom a pólmi. V dôsledku tohto gradientu sa energia redistribuje smerom od rovníka k pólom. Deje sa tak prostredníctvom konvekčných buniek resp. slučiek, ktoré vznikajú prepojením cyklón a anticyklón (napr. v kpitole 4.1.2 sme opísali Hadleyho bunky, ktoré siahajú od rovníka po zhruba 30° severnej alebo južnej zemepisnej šírky.). Kľúčovými komponentami disipatívnych štruktúr a disipatívnych procesov sú v tomto prípade vzájomne prepojené systémy cyklón a anticyklón a s nimi spojených cirkulácií vetrov.

K emergentným vlastnostiam globálneho klimatického systému patrí tiež účinná distribúcia vlahy z oceánov na pevninu vo forme orografických, konvekčných alebo cyklonálnych zrážok. V našich miernych zemepisných šírkach je počasie vysoko premenlivé, na styku obrovských más studeného polárneho vzduchu a teplého tropického a subtropického vzduchu vznikajú putujúce cyklóny postupujúce na severnej pologuli smerom na východ a prinášajúce vlahu od oceánu hlboko do vnútrozemia. V posledných dvoch desaťročiach sme svedkami vyšších oscilácií, rozkolísanosti tohto systému.

Adiabatický proces sa výrazne uplatňuje aj pri vzniku tropických cyklón a monzúnových dažďov. Horolezci v Himalájach preto musia na výstupy využívať iba zimné a jarné mesiace, kedy je nad vychladeným ázijským kontinentom obrovská Sibírska výš, ktorá prináša dlhodobé jasné počasie. Naopak, v lete sa obrovská masa ázijskej pevniny vyhreje, stúpajúci vzduch sa ohrieva a rozpína, barometrický tlak sa znižuje a následné vetry, ktoré smerujú od Tichého oceána dovnútra Ázijskej níže (do miesta nižšieho tlaku), prinášajú do veľkej časti kontinentu daždivé monzúnové počasie.

Upravené podľa: STRAHLER & STRAHLER 1997

Podľa ROCKSTRÖMA et al. (2009) globálny klimatický systém predstavuje jeden z kľúčových život udržiavajúcich systémov Zeme, ktorého ekologické limity sú v súčasnosti výrazne narušené. Tieto limity znamenajú obmedzenia, pri rešpektovaní ktorých by ľudské aktivity mali byť ešte v bezpečí, t.j. udržateľné.

6.2.2 Nerovnovážna termodynamika zložitých živých systémov

Podľa termodynamickej teórie ekologických systémov (JØRGENSEN & SVIREZHEV 2004) **biologická a ekologická zložitosť** predstavuje „spontánnu odpoveď“ živého systému na určité, relatívne stabilné vonkajšie prostredie a na určitý prísun energie, za účelom čo najlepšie využiť túto energiu a ďalšie dostupné prírodné zdroje (princíp maximálneho výkonu resp. maximálnej účinnosti, ODUM 1977). Aj priestorový a časový rozsah biologických a ekologických procesov sa zvyšuje s rastom zložitosti.

Koncepciu nerovnovážnej termodynamiky (NeTd) adaptovali pre tieto systémy SCHNEIDER & KAY (1994), JØRGENSEN & SVIREZHEV (2004) a ďalší. Z hľadiska termodynamiky biologické a ekologické systémy existujú **v termodynamicky nerovnovážnom stave**, pričom podliehajú variáciám v čase a priestore. Každý prísun kvalitnej energie do takéhoto systému totiž vychyľuje z jeho termodynamickej rovnováhy s prostredím. Aby sa systém s takto vzniknutým energetickým gradientom vyrovnal, musí túto energiu premeniť a disipovať (transformovať na energiu nižšej kvality, t.j. s nižšou exergiou).

Táto disipácia sa realizuje **spontánnou tvorbou disipatívnych štruktúr a procesov**, ktorými systém súčasne zvyšuje svoju vnútornú organizáciu, v ktorej sa časť kvalitnej energie uchováva (PRIGOGINE 1997; JØRGENSEN 2012). Čím je vyšší prísun energie, tým systém buduje zložitejšiu organizáciu, v ktorej dokáže uchovávať viac kvalitnej energie. Zvyšnú časť transformovanej energie disipuje do prostredia, najmä v podobe tepla. Disipatívne štruktúry organizmov a ekosystémov sú aj zásobníkmi látky, energie a informácie. Táto koncepcia umožňuje vysvetliť rast organizmu, ekologickú sukcesiu, aj biologickú evolúciu ako cestu postupného rastu disipácie energie (SALTHE 2005).

Podľa KAYA (2000, 2002) disipatívne štruktúry živých systémov predstavujú **energetické fluktuácie**, existujúce blízko limitov fungovania systému, ktoré môžu byť relatívne stabilizované (v stavoch dynamickej vnútornej rovnováhy – homeostázy a homeodynamiky) práve disipáciou tokov energie. Tu treba uviesť, že termodynamická a homeodynamická rovnováha sú dve veľmi rôzne polohy systému (napr. termodynamická rovnováha organizmu nastáva až v momente jeho smrti). **Vnútorná rovnováha ekologického systému znamená**, že tento sa dokázal s prísunom vysokokvalitnej energie vyrovnať jej využitím na spontánnu tvorbu a udržanie zložitých autopoietických sietí – to znamená na spontánne autoorganizačné sebavytváranie fyzickej štruktúry a procesov na nej realizovaných a tiež na následné autoregulačné udržanie takto vytvoreného systému, jeho štruktúry aj jeho funkčnosti, správania. Domény tejto dynamickej vnútornej rovnováhy systému reprezentujú postupnosti jeho viacnásobných (aj alternatívnych) rovnovážnych stavov.

Je zrejmé, že **úroveň zložitosti živého systému súvisí s veľkosťou prísunu energie.** Čím vyšší je prísun energie, tým viac jej môže využiť na rozvíjanie svojho vnútorného štrukturálneho aj behaviorálneho usporiadania v podobe zložitejších disipatívnych štruktúr a procesov, ktorými zefektívňuje existujúce a vytvára nové „cesty“ disipácie energie (JØRGENSEN 2012). Rovnaký objem energie aký systém prijme, musí aj exportovať, ale podľa druhého termodynamického zákona je časť transformovanej energie nižšej kvality, viac rozptýlená (disipovaná). Systém udržiava svoje usporiadanie práve preto, že túto menej kvalitnú energiu exportuje do svojho okolia, čím znižuje svoju vnútornú entropiu (zvyšuje svoju usporiadanosť) a naopak zvyšuje entropiu okolia. Pre úplnosť treba uviesť, že podmienkou tvorby týchto štruktúr je aj dostatok ďalších prírodných zdrojov, predovšetkým vlahy a živín.

Podľa SCHNEIDERA a KAYA (1994) smerovanie systému k optimálnej absorpcii a disipácii slnečnej energie umožňuje **vysvetliť aj úžasnú symetriu až pravidelnosť tvarov v rastlinnej ríši** (napr. habitusy stromov, kvety bylín, štruktúra plodov a iné), pretože táto symetria umožňuje efektívnejšiu disipáciu energie. Podľa biológov vývoj anatomických štruktúr v organizmoch (napr. kvetov a plodov, končatín, očí, uší a pod.) regulujú tzv. **homeotické gény,** ktoré kódujú tvorbu proteínov riadiacich rýchlosť prepisu genetickej informácie z DNA do RNA (tzv. transkripčné faktory), čím regulujú zapínanie a vypínanie génov tak, aby k vyjadreniu príslušného génu došlo vždy v správnom čase a v správnych bunkách, čím sa bunky diferencujú a špecializujú a formujú sa špecifické orgány organizmu (STARR et al. 2013).

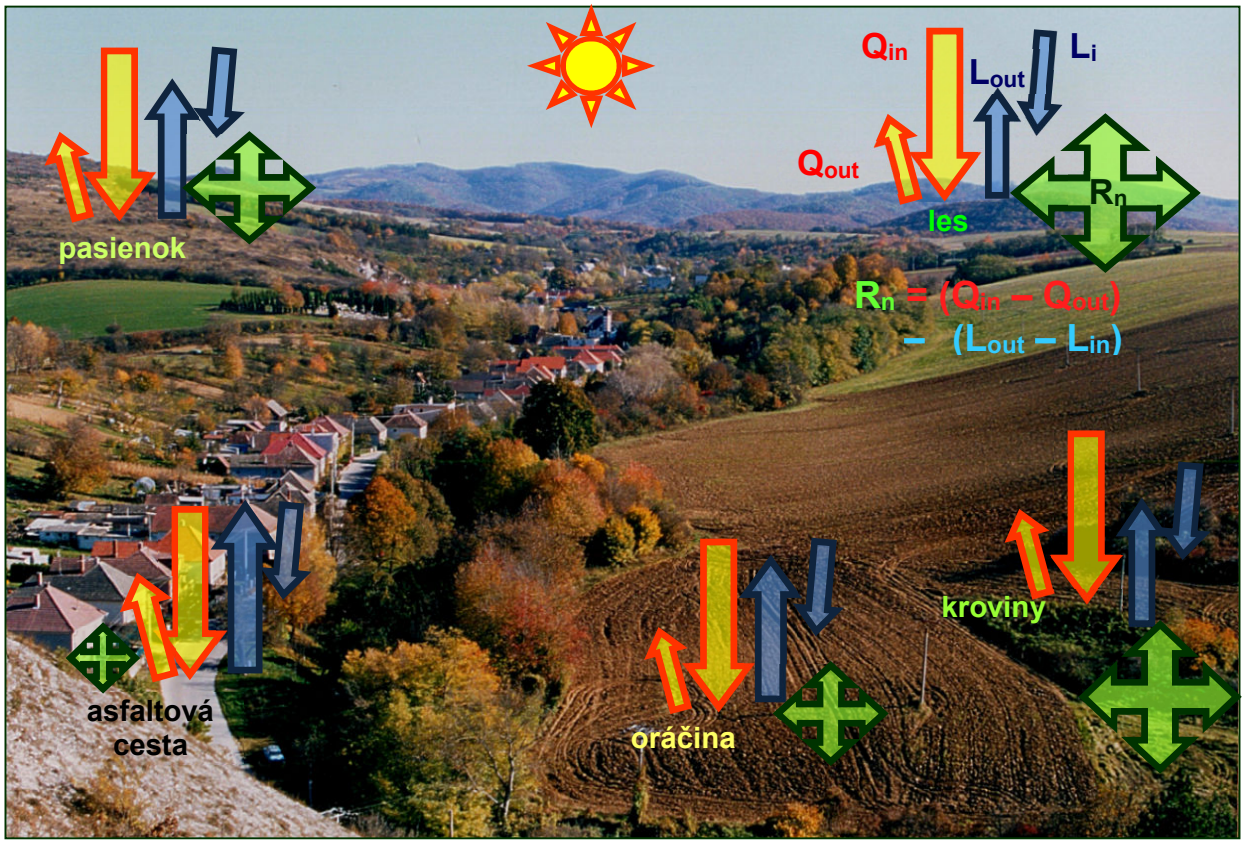
Úroveň organizácie, zložitosti ekologického systému a disipácia energie

Disipatívne procesy prebiehajúce na spontánne vytváraných a udržiavaných disipatívnych štruktúrach ekologického systému teda zvyšujú a udržiavajú jeho vysokú organizovanosť za cenu transformácie a disipácie energie. Každý živý systém má určitú **prirodzenú úroveň zložitosti,** pri ktorej je jeho správanie optimálne a vitalita vysoká. Táto úroveň sa v priebehu vývojového cyklu mení. Vyššia komplexita znamená vyššiu mieru organizácie, usporiadania systému, preto je charakteristická pre klimaxové štádiá vegetácie, ktoré charakterizuje vyššia diverzita, previazanosť a špecializácia druhov. **Čím je**

ekosystém rozvinutejší, tým viac energie dokáže spotrebúvať, uchovávať a súčasne disipovať, to znamená, že tým je disipácia energie účinnejšia. Keďže podstatnou zložkou živej biomasy je vegetácia, práve vegetácia disipuje aj najviac slnečnej energie, deje sa to predovšetkým procesmi transpirácie.

Z tejto skutočnosti vyplýva, že **miera účinnosti disipácie energie môže byť vhodným nástrojom na indikovanie úrovne organizácie, zložitosti** ekologického systému (ZHANG & WU 2002). Táto úroveň organizácie, usporiadanie ekosystému je zreteľné predovšetkým na úrovni organizácie jeho vegetácie, ako fyziognomicky najdominantnejšej zložky. Funkčnú zložku ekologickej komplexity môžeme následne hodnotiť s využitím meraní bilancie slnečného žiarenia resp. povrchovej teploty ekosystémov. Platí totiž, že čím je vyššia disipácia slnečnej energie resp. jej využitie na budovanie zložitejších štruktúr, tým bude povrch vegetácie chladnejší (samozrejme za podmienky, že hodnoty ostatných abiotických premenných ekosystému sú viac-menej konštantné).

Radiačnú bilanciu ekosystému, t.j. čistú ním využitú transformovanú energiu R_n vyjadruje vzorec: $R_n = Q_{in} * (1 - \alpha) - (L_{out} - L_{in})$, kde Q_{in} je globálny tok krátkovlnného slnečného žiarenia k povrchu ekosystému, α je albedo tohto povrchu (podiel od neho odrazeného žiarenia), $L_{out} = \varepsilon\sigma T^4$ je dlhovlnné, infračervené (IR) žiarenie emitované povrchom, L_{in} je dlhovlnné žiarenie vyžiarené späť k tomuto povrchu skleníkovými plynmi atmosféry (QUATTROCHI & LUVALL 1999). Vzťah medzi tokom energie emitovanej povrchom ekosystému a jeho teplotou definuje Stefanov-Boltzmannov zákon: $L_{out} = \varepsilon\sigma T^4$, kde L_e je tok emitovaného IR žiarenia (udáva sa vo $W.m^{-2}$), ε je emisivita povrchu, σ je Stefan-Boltzmanova konštanta ($\sigma = 5{,}67 * 10^{-8}$ $W.m^{-2}.K^{-4}$) a T je absolútna teplota povrchu v kelvinoch. (Absolútnu teplotu T získame tak, keď k teplote udávanej v Celziovej stupnici pripočítame hodnotu 273,15 °.)



Obr. 6.4. Náčrt energetickej bilancie systému atmosféra – povrch ekosystému. Čím má systém vyššiu schopnosť disipácie slnečnej energie, tým viac jej využíva na budovanie svojich disipatívnych štruktúr a procesov, tým je usporiadanejší. Gradient rastu zložitosti tu vidíme od asfaltu cez pôdu, trávnik a kroviny až po lesný ekosystém. *Schéma a foto:* © Peter Sabo, 2010.

Využitie energie R_n v ekosystéme opisuje rovnica $R_n = LE + H + G + F$, kde LE je energia využitá v procese evapotranspirácie (skupenské teplo), H energia ohrievajúca ovzdušie (citeľné teplo), G je tepelný

tok do pôdy a F energia využitá na fotosyntézu. Tá predstavuje menej ako 1%, preto sa F pri kvantifikácii R_n (podobne aj teplo generované metabolizmom živočíchov) zanedbáva (MAES 2011). Vo vegetačnom období ekosystémy najviac energie využívajú na evapotranspiráciu, v prípade lesných ekosystémov to môže byť až 60 % nimi zachytenej energie (LIN et al. 2009, 2010). Závislosť medzi schopnosťou systému disipovať slnečnú energiu a zložitosťou jeho usporiadania ilustrujeme na obr. 6.4.

Najnižšiu schopnosť disipácie tu má asfaltová cesta, v ktorej sa realizujú iba jednoduché fyzikálne a chemické reakcie a preto je jej povrch za jasných dní v lete horúci, s vysokým vyžarovaním tepla. Nasleduje zorané pole, kde sa už vo väčšej miere uplatňuje aj evaporácia. Ešte vyššiu schopnosť disipácie slnečnej energie majú povrchy pokryté vegetáciou, kde sa už uplatňuje aj transpirácia a táto schopnosť sa zvyšuje smerom od travinno-bylinných spoločenstiev, cez kroviny až k lesu, ktorý charakterizuje najvyššia relatívna evapotranspirácia v danom území, ako aj zložitý metabolizmus.

Vznik novej kvality prostredníctvom oscilácií, bifurkácií a katastrof

Podľa teórie nerovnovážnej termodynamiky sa disipatívne štruktúry živých systémov rozvíjajú ako odpoveď na zmeny vychýlenia systému zo stavu termodynamickej rovnováhy (v dôsledku prísunu energie). Na prísun energie odpovedajú najprv autoregulačné mechanizmy, ktoré sa snažia udržať systém blízko jeho rovnovážnych stavov. Pri veľkom vychýlení však aj malá zmena hodnôt parametrov systému môže viesť k tomu, že **oscilácie hodnôt kritických premenných systému** sa stanú také veľké, že systém ich neutlmí a reaguje náhlou zmenou svojej organizácie, ktorá je kvalitatívne iná ako tá pôvodná.

Proces kvalitatívneho zvratu organizácie systému sa nazýva **bifurkácia** a znamená náhlu zmenu atraktora správania (cyklických postupností stavov systému) v dôsledku akumulácie malých zmien hodnôt niektorej z kritických riadiacich premenných systému (napr. v geografii je príkladom bifurkácie vetvenie riek v riečnych deltách). Prah, za ktorým systém náhle prechádza do nového usporiadania, s novou štruktúrou aj správaním (novou postupnosťou stavov, ktorými prechádza), sa nazýva **bifurkačný bod.**

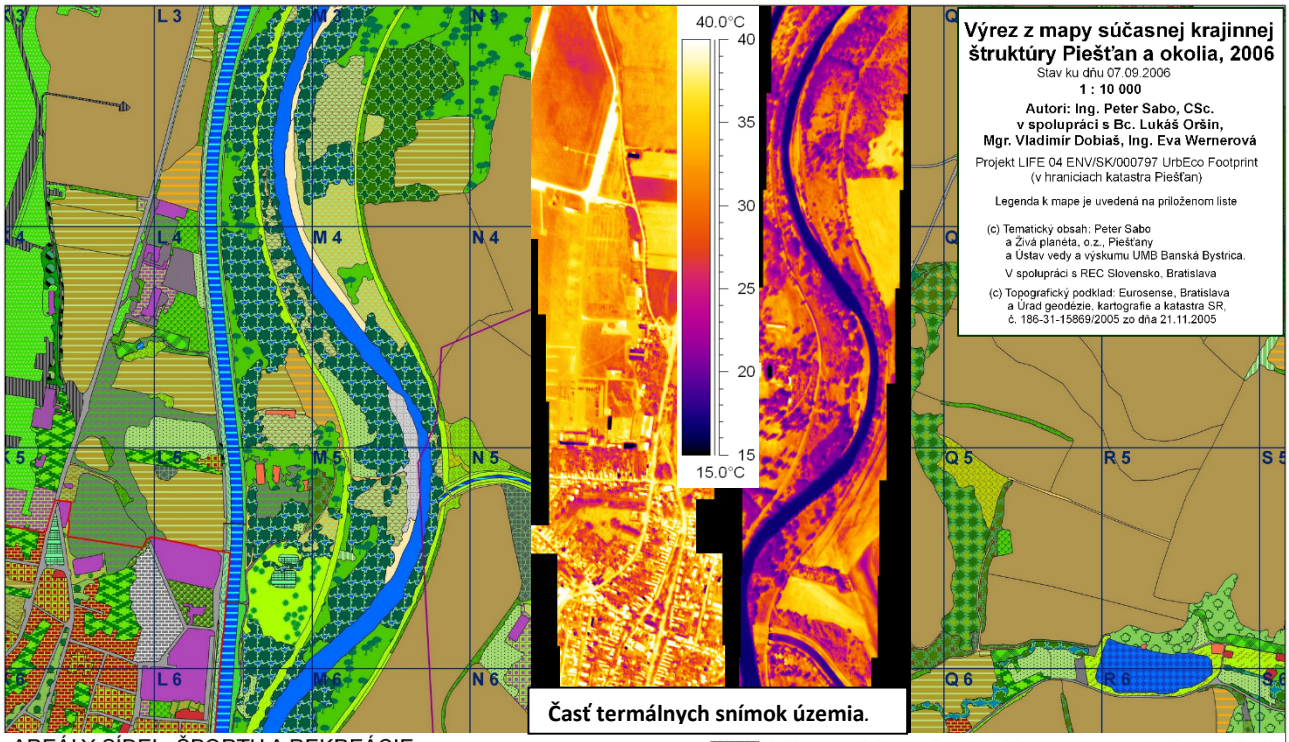
Pre porozumenie významu tohto procesu pre *vývoj* zložitosti systému si skúsme predstaviť jej jednotlivé aspekty (podľa REITSMA 2002, upravené): Zložité systémy charakterizuje predovšetkým zložitá fyzická štruktúra, stavový priestor, s právanie a organizácia:

1) Fyzickú štruktúru systému tvoria prvky a väzby medzi nimi.
2) Stavový priestor definuje ktoré vytvárajú zreteľné atraktory.
3) Správanie systému ako celku je určené vzájomnými interakciami jeho prvkov a ich interakciami s prostredím, pričom ich ako emergentný atribút presahuje.
4) Organizácia systému je dynamické kontinuum, ktorého polárne extrémy sú poriadok a chaos.

Výsledkom bifurkácie je zmena každého z týchto štyroch atribútov. Zložité ekologické systémy existujú na rozhrní determinizmu a náhodnosti a bifurkácie znamenajú prechod systému do nového stavu resp. do novej postupnosti kvázi-rovnovážnych stavov.

S koncepciami bifurkácií a atraktorov úzko súvisí **teória katastrof** (THOM 1977), ktorá prostredníctvom jazyka matematiky vysvetľuje náhle zmeny správania systému nastávajúce v dôsledku postupných, hoci malých zmien jeho prametrov. Aj **prírodné katastrofy** sú v podstate iba obrovskými bifurkáciami, ktoré sú dôsledkom postupnej akumulácie malých zmien systému a vedú k náhlej zmene jeho doterajšieho rovnovážneho stavu (resp. postupnosti kvázi-rovnovážnych stavov).

Príkladom je zemetrasenie, pri ktorom sa náhle uvoľní energia, ktoré sa akumulovala na styku dvoch tektonických platní alebo nástupy ľadových dôb v dôsledku postupných malých zmien toku slnečného žiarenia k zemskému povrchu spôsobených variabilitou orbitálnej dráhy Zeme (DITLEVSEN 2009). Teória katastrof (THOM 1977) sa snaží vysvetliť genézu prírodných katastrof, ako aj náhle zmeny správania spoločnosti. Pre zložité prírodné a sociálne systémy je charakteristické, že aj malé vychýlenie, zväčša v dôsledku vonkajších impulzov, môže na makroskopickej úrovni viesť k radikálne novému správaniu sa systému.



Časť termálnych snímok územia.

Obr. 6.5. Výrez z mapy druhotnej krajinnej štruktúry oblasti Piešťan (2006) a z termálnej mapy (7. 9. 2006). Okrem vody má v dôsledku disipácie slnečnej energie značný ochladzujúci efekt aj vegetácia. *Autori mapy*: © Peter Sabo, Lukáš Oršin, Vladimír Dobiaš, Eva Wernerová. *Termálna mapa:* REC Slovensko / Živá planéta & Photomap s. r. o., Košice, 2006. *Zdroj:* SABO et al. 2007.

Katastrofické zosuvy v Krivánskej Fatre z pohľadu nerovnovážnej termodynamiky

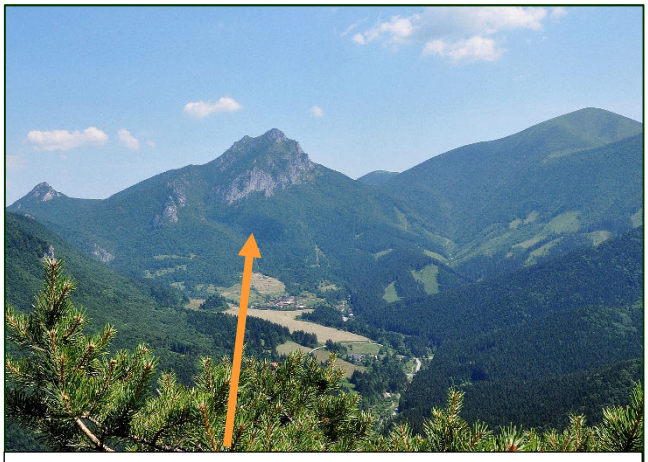
Prírodné hrozby (*natural hazards*) sú prírodnými procesmi podmienené potenciálne narušenia ekosystémov alebo ich zložiek, ktoré ohrozujú životy ľudí, majetok alebo životné prostredie človeka (napr. zemetrasenia, sopečné erupcie, víchrice, povodne, vlny horúčav a pod). Riziko vyjadruje pravdepodobnosť, že príslušný proces nastane. Z pohľadu ekosystémov ide o prírodné narušenia (disturbancie), náhle vonkajšie prírodné udalosti, ktoré narúšajú fyzickú štruktúru a funkcie spoločenstiev a ekosystémov. Charakterizuje ich frekvencia výskytu, intenzita, priestorový rozsah a následky.

K prírodným narušeniam až katastrofám možno zaradiť aj také zosuvy, pri ktorých dochádza k odtrhnutiu značného množstva hornín a ich náhlemu, rýchlemu posunu po svahu, ktorý má nepriaznivé následky na ľudí, majetok alebo ekosystémy. Strmé svahy charakterizuje termodynamická nerovnováha, ktorá vyplýva z topografických gradientov polohovej energie objektov (hornín) na ich svahoch, ktorá sa pri zosuve mení na kinetickú energiu. Zosuvný proces je v podstate dispatívnym procesom, ktorý znižuje uvedený gradient. Je to tzv. gravitačný proces, spolu s opadom, skalným rútením a murovými prúdmi. Kým pri zosuvoch ide o posuv na rozhraní dvoch rozličných hornín (napr. rôzne priepustných), murové prúdy aktivujú rozrušené (a často v dôsledku zrážok zvodnené) horniny, napr. sutiny. Podobne ako iné denudačno-akumulačné procesy (napr. vodná erózia) majú eróznu, transportnú aj akumulačnú zložku, ktorá vytvára zodpovedajúce štruktúry (odlučná hrana zosuvu, akumulačná časť s čelom zosuvu).

Krivánska Fatra je mimoriadne náchylná na denudačné procesy na svahoch. Z plochy nad hornou hranicou lesa je tu lavínami postihnutý väčší podiel územia než vo Vysokých Tatrách a priemerný odnos pôdy je tu tretí najvyšší zo všetkých našich vysokých pohorí. Geologické podložie tvoria vápencovo-dolomitické komplexy uložené na slieňoch, slienitých vápencoch a bridliciach. Vrcholové časti Krivánskej Fatry sú odlesnené, majú strmé svahy a na eróziu náchylné horniny. Synergia pôsobenia týchto faktorov vytvára predpoklady pre vznik zosuvov pozdĺž šikmo sklonených vrstevných plôch a v kombinácií s extrémnymi zrážkami vedie aj k silným procesom vodnej erózie a k sutinovým prúdom.

V Krivánskej Fatre sa odohrali dve ukážky takýchto prírodných katastrof, odlišujúce sa geologickými a reliéfovými podmienkami. Prvá sa odohrala v Kreminnej doline medzi hrebeňom Poludňových skál a Skalným mestom pod Veľkým Rozsutcom. Dňa 11. júna 1848 po prudkej nočnej búrke s vysokými zrážkami zišiel úzkou a hlbokým výmoľom (vrezaným do podložia slienitých bridlíc) hlinito-kamenitý príval. Zhruba 25 000 m^3 hliny, kamenia, balvanov a polámaných stromov zavalilo väčšiu časť vtedajšej osady Štefanová (ktorá bola vtedy umiestnená pri vyústení Kreminnej doliny) a zabilo 14 ľudí. Hrebeň Poludňových skál, na ktoré viedol chodník, zasiahnutý nebol.

Druhou ukážkou je zosuv okolo kóty Hromové (1 636 m n.m.) 21. júla 2014. Vrcholová časť hrebeňa medzi Chlebom a Stenami je tu rozčlenená sústavou trhlín, ktoré v oblúku presahujú hrebeň a po strmom



Obr. 6.6.a. Kreminná dolina medzi Poludňovými skalami a masívom Veľkého Rozsutca. V minulosti ňou viedol frekventovaný turistický chodník. *Foto:* © Peter Sabo, 2015.

Obr. 6.6.b. Odtrhy pod vrcholom Hromového vo Vrátnej doline sú dôsledkom synergie extrémnych zrážok, strmosti svahov a náchylnosti hornín k erózii. *Foto:* © Martina Škodová, 2015.

Katastrofické zosuvy v Krivánskej Fatre – pokračovanie

severozápadnom svahu pokračujú do Vrátnej doliny. Rozvoľnenie horninového masívu v hrebeňovej časti je tu dôsledkom tlakových deformácií plastického podložia (ílovitých werfénskych bridlíc) pod tlakom mohutného vápencového komplexu. Trhliny, zväčša skryté v tráve, sa miestami rozširujú až na 1 m, keďže sú však zväčša zasypané sutinami, málokde presahujú hĺbku 1 m. Krajné čelá blokov, v ktorých vystupujú vápencovo-slienité súvrstvia, sa rozpadajú tak, že nastáva padanie úlomkov až rútenie skál. Rozvoľnený materiál sa hromadí dolu na svahu, kde nastáva zosúvanie podmienené plazivými vlastnosťami ílovitých bridlíc.

Vysoké zrážky, ktorých úhrn v daný deň vo Vrátnej bol 67 mm za 3 hodiny, sa pod hrebeňom Hromového stali spúšťačom hlinito-kamenitých murových prúdov , ktoré sa spojili v lievikovitých dolinách asi 560 m od údolnej stanice lanovky. Po odtrhnutí v oblasti Hromového hlinito-kamenistá masa nabrala rýchlosť až 40 km za hodinu a spôsobila veľké škody. Objem premiestneného materiálu sa odhaduje na 100 000 m^3. Zopár desiatok menších sutinových zosuvov sa vyskytlo aj pod hrebeňom medzi Hromovým a Stenami.

Z teórie nerovnovážnej termodynamiky zložitých systémov vyplýva, že aj takéto prírodné disturbancie sú prirodzenými procesmi vyrovnávania gradientov energie a preto ich vzniku sa zabrániť nedá. Navyše v dôsledku zmeny klímy pravdepodobne budú častejšie. Môžeme však zvýšiť rezistenciu a rezilienciu ekosystémov: svahy horských masívov chráni pred denudačnými procesmi predovšetkým vegetačný kryt.

Aká je súčasná situácia v Krivánskej Fatre na týchto dvoch miestach rizikových zosuvov?

Silný turistický ruch na bývalom značenom chodníku zo Štefanovej na Poludňové skaly viedol v minulosti k zošľapávaniu vegetácie a k hrnutiu štrkových sutín turistami. Niekoľko desaťročí po zrušení chodníka sa už južné svahy medzi hrebeňom Poludňových skál a hlbokou roklinou Kreminného potoka vyznačujú pestrou vegetáciou travinných spoločenstiev reliktných vápencových bučín a bukových javorín, s prevahou polotieňomilných druhov. Na sutinovej rendzine je významné zastúpenie vápnomilných termofytov spolu s horskými druhmi. Významný je tu aj výskyt hybridogénnych druhov jarabiny, ktoré reprezentujú západokarpatské ružovo kvitnúce populácie *Sorbus haljamove* a *Sorbus graeca*.

Možno zhrnúť, že sutinové ryhy vzniknuté po roku 1848 a zbiehajúce spod hrebeňa Poludňových skál sa vďaka dlhodobým sukcesným procesom postupne stabilizujú a intenzita posunu štrkového materiálu od hrebeňa Poludňových skál smerom do Kreminného potoka sa aj na strmých svahoch spomaľuje. Z hľadiska adaptívneho vývojového cyklu (opísaného v časti 6.3.1) sa ekosystém vápencovej bučiny nachádza vo fáze rastu (zodpovedá štádiu dorastania lesného cyklu), kedy pružne reaguje na vonkajšie stresy. Ekosystém bukovej javoriny sa nachádza v konzervačnej fáze (vo vývojovom štádiu optima).

Analýza opisovaného zosuvu nad hornou hranicou lesa v oblasti Hromového ukazuje, že príčinou katastrofického zosuvu pôdy v tejto oblasti bola synergia náchylnosti hornín k erózii (slienité vápence a bridlice), dlhodobá erózia, veľký sklon georeliéfu (nad 30°), extrémne vysoká zrážková anomália, cirkulácia ovzdušia a narušený vegetačný kryt. Z hľadiska dispozície georeliéfu na pôdnodeštrukčné procesy v oblasti medzi Stohom a Veľkým Kriváňom možno predpokladať, že k podobným procesom dochádzalo v Krivánskej Fatre v celom postglaciálnom vývoji, čo mohlo viesť k vzniku trvalých plôch bezlesia, ktoré však nemožno porovnať z rozsahom súčasných trávnatých plôch.

K sústavnému znižovaniu hornej hranice lesa dochádzalo najmä počas valaskej kolonizácie v 15. – 16. storočí. Voľné miesta po odstránenej kosodrevine zaujali druhy pôvodných nelesných spoločenstiev z refugiálnych stanovíšť akými boli strmé skalné svahy, lavínové dráhy, závery úzkych dolín, sutiny a iné nezalesnené plochy. V súčasnosti je tu dĺžka hornej hranice lesa ohrozovanej svahovými zosuvmi najväčšia zo všetkých vysokých pohorí Slovenska.

Možnosti zmiernenia tohto prírodného rizika v oblasti Hromového sú najmä:

1) Potrebné je zvýšiť rezilienciu ohrozených ekosystémov – posilniť prirodzenú vegetačnú pokrývku.
2) Potrebné je znížiť vysoké zaťaženie územia turizmom – tým znížiť deštrukciu vegetačného krytu.
3) Potrebné je zamedziť holorubom pod hornou hranicou lesa, limitovaním rozvoja lyžiarskych stredísk na strmých svahoch a obmedzením aktivít, ktoré tu podporujú eróziu pôdy a hornín.

Upravené podľa: BALIAK et al. 1981; MIDRIAK 1983, 1993; HUBA 1988; BERNÁTOVÁ et al. 1998; JAKÁL 1998; DOBOŠOVÁ 2002; TOPERCER et al. 2004; KLEIDON 2009; ŠABO 2010; LIŠČÁK et al. 2014; ŠIBÍK et al. 2015; VOLOŠČUK et al. 2015, 2016.

Od hierarchie k holarchii, SOHO systémy

Pojem hierarchie sa spája s nadriadenosťou vyššieho systému voči nižšiemu. To však nevystihuje existenciu recipročných vzťahov medzi rôznymi úrovňami hierarchie, vrátane pravidla, že úžitky získané celkom systému majú byť prínosom aj pre jeho prvky. Podľa KAYA (2000) **pojem holarchia označuje** 1) hierarchické usporiadanie, ktoré vzniká vnáraním, integráciou jednoduchších komponent (subsystémov) do zložitejších systémov; 2) zdôrazňuje aj recipročné vzťahy vzájomnej koordinácie medzi rôznymi hierarchickými úrovňami. Treba tiež brať do úvahy, že v dôsledku vzájomných interakcií prvkov vznikajú na každej úrovni hierarchie nové, emergentné vlastnosti systému.

Porozumieť zložitosti takejto organizácie môžeme iba z perspektívy viacerých hierarchických úrovní. Napr. výskum ekosystému má zahŕňať aj štúdium druhov jeho jednotlivých trofických úrovní. Súčasne treba brať do úvahy aj hierarchicky vyšší kontext krajiny alebo zemského systému a jeho život udržiavajúce systémy (napr. hydrologický cyklus, cyklus uhlíka a pod.). V tomto kontexte je významná aj **koncepcia samoorganizujúcich sa holarchických otvorených systémov** (SOHO systémy – *Self-organizing Holarchic Open Systems*, KAY 2000). Základné vlastnosti SOHO systémov sumarizuje KAY (2000).

Patria medzi ne nelinearita správania systému; holarchické vnáranie sa holónov do vyšších systémov; zložitá vnútorná kauzalita, spätné väzby a autokatalytické cykly spolu vedúce k emergentným vlastnostiam; systém je životaschopný v určitom rozmedzí prirodzenej zložitosti (tzv. okno vitality), charakterizuje ho vysoká dynamika a viacnásobné rovnovážne stavy; z dlhodobého hľadiska chaotické a periodicky až katastrofické správanie. Autoorganizácia SOHO systému umožňuje efektívnejšie využitie prírodných zdrojov a zvyšuje celkovú životaschopnosť systému (SCHNEIDER & KAY 1994).

Vysoká zložitosť, nelinearita a s nimi spojená ontická otvorenosť zložitých biologických, ekologických, aj sociálnych systémov, ktorá sťažuje ich kvantitatívne analýzy vedie k tomu, že nutnou súčasťou výskumu takýchto systémov sú aj slovné opisy (tzv. naratívny prístup – KAY 2000).

6.2.3 Environmentálne implikácie nerovnovážnej termodynamiky

Z koncepcie nerovnovážnej termodynamiky vyplýva, že zložitosť usporiadania systému je primeraná veľkosti energie, ktorú systém prijíma a ďalším ekologickým podmienkam. To vysvetľuje nielen zonalitu vegetácie, ktorá sa mení so zmenou oslnenia a teploty zemského povrchu (kap. 4.1.3), ale aj mimoriadne vysokú ekologickú zložitosť a tým aj druhové bohatstvo tropických dažďových pralesov. Za ďalší predpoklad tejto zložitosti sa považuje aj pomerne stabilná, hoci nie stále rovnaká klíma.

Vysoká zložitosť tropických dažďových pralesov

Enormne vysoká zložitosť usporiadania tropických dažďových pralesov, v ktorých je koncentrovaných minimálne 50 %, podľa niektorých autorov až 90 % druhového bohatstva zemskej súše (obr. 6.6) potvrdzuje tézu, že vysoká ekologická zložitosť je **spontánnou odpoveďou ekologického systému** na relatívne stabilné vonkajšie prostredie a kontinuálny prísun kvalitnej energie.

Disipatívne štruktúry a disipatívne procesy tropického dažďového pralesa sa totiž vyvinuli za podmienok vysokého prísunu slnečnej energie a vysokej vlhkosti, ktorú tu boli relatívne stabilné po milióny rokov (niektorí vedci napr. uvádzajú, že teplota Amazonského pralesa (obr. 6.7) sa po ukončení doby ľadovej zvyšovala približne iba o 0,1 °C za 100 rokov – MALHI et al. 2009). Mimoriadne vysoká komplexita života sa tu vytvorila aj napriek tomu, že pôdy takýchto pralesov nepatria k vysoko úrodným, nakoľko živiny sú z nich pravidelne vymývané prudkými dažďami. Príroda však aj v tomto prípade našla riešenie, nedostatok živín tu nahrádza ich zrýchlený obeh – pri vyššej teplote a vlhkosti sú rýchlosť rozkladu odumretej organickej hmoty aj rast rastlín oveľa vyššie ako v miernom pásme.

Extrémna zložitosť týchto zdanlivo robustných ekosystémov je však aj dôvodom ich krehkosti, vy-

žadujú oveľa dlhší čas obnovy ako listnaté lesy mierneho pásma. **V období 1980 až 2000 bolo zlikvidovaných 100 miliónov ha tropických pralesov** (IPBES 2019). Najmä od roku 2006 sa ich úbytok znižoval, aj keď napr. v roku 2016 bol v porovnaní s rokom 2015 viac ako dvojnásobný, ale aj naďalej ostáva veľmi vysoký. V roku 2019 to bolo 3,8 milióna hektárov (WRI 2019).

Znamená to každoročnú stratu tisícov až desaťtisícov druhov a destabilizáciu globálneho klimatického systému, nielen znížením kapacity prírodných záchytov skleníkového plynu CO_2, ale súčasne aj zohrievaním veľkej časti zemského povrchu v dôsledku výraznej redukcie jeho kapacity disipovať slnečnú energiu. K tomu prispieva aj devastácia lesov, pretože ekosystémové služby sú v degradovaných lesoch výrazne oslabené (GHAZOU et al. 2017).

Obr. 6.7. Tropický dažďový prales v oblasti Mindo, Andy, Ekvádor. Tieto pralesy sú domovom výnimočnej biodiverzity. Na rozlohe 19 200 ha sa tu chráni zhruba 450 druhov vtákov, z toho 87 endemitov a rastie tu asi 170 druhov orchideí. Tento chránený prales ročne navštívi 20 – 25 tisíc ľudí. V nedávnej minulosti územie ohrozovali plány vybudovania ropovodu, ktoré zastavili protesty miestnych obyvateľov.

Zdroj: FRIES et al. 2006.

Princípy maximálneho výkonu a maximálnej produkcie entropie

Vysoká zložitosť pralesa súvisí s tendenciou systému smerovať k maximálnemu využitiu a súčasne k maximálnej disipácii dostupnej voľnej energie a ďalších prírodných zdrojov práve zvyšovaním zložitosti svojho usporiadania (JØRGENSEN & SVIREZHEV 2004). Už v v 20. rokoch minulého storočia americký matematik a štatistik Lotka sformuloval hypotézu, že ekologický systém sa vyvíja takým smerom, **aby maximalizoval celkový tok energie cez systém**, čo vedie k tomu, že v ekosystéme prežívajú tie organizmy, ktoré dokážu čo najúčinnejšie využiť dostupnú energiu. Táto energia u ekosystémov s prvou trofickou úrovňou zelených rastlín pochádza z energie slnečného žiarenia (CHAPMAN et al. 2016).

Tento princíp v 50. rokoch rozvinuli H.T. ODUM & PINKERTON (1955), podľa ktorých sa systém vyvíja tak aby maximalizoval svoj energetický výkon. Ide o tzv. **princíp maximálneho výkonu** (MPP – *maximum power principle*). To si vyžaduje maximalizovať energetickú priepustnosť ekosystému ako celku. Howard Thomas Odum túto tézu považoval za štvrtý termodynamický zákon (CHAPMAN et al. 2016).

Podľa JØRGENSENA (2012) uvedený princíp vedie **k maximalizácii transformácie, využitia a disipácie energie.** Napr. pri sukcesii sa postupne mení podiel produkcie voči respirácii, ako systém dozrieva do klimaxového štádia, blíži sa k hodnote 1, to znamená, že v klimaxe sa prakticky všetka zachytená energia „predýcha“. Súčasne sa však zvyšuje aj podiel v systéme uchovávanej kvalitnej energie.

Analogickým princípom k MPP je **princíp maximálnej produkcie entropie** (MEPP – *maximum entropy production principle*), podľa ktorého má živý systém tendenciu zvyšovať produkciu entropie a preto sa vyvíja smerom k zložitejším štruktúram a procesom, pretože so zvyšovaním organizovanosti systému sa nevyhnutne zvyšuje aj rýchlosť produkcie entropie. Prostredníctvom tohto princípu KLEIDON (2009) vysvetľuje dynamiku Zemského systému a význam prírodných disturbancií.

Ako sa vysporiadať s rastom entropie: recyklácia živín a odpadov

Rast entropie okolia biologického alebo ekologického systému je nevyhnutným výsledkom transformácie energie v danom systéme: V prípade trofických r;eťazcov má entropia formu odpadového tepla, úbytku živín v pôde, a do určitej miery aj exkrementov živočíchov (aj keď tie ešte obsahujú aj časť kvalitnej, využiteľnej energie). Evolúcia však vynašla riešenie, aby sa planéta neutopila v záplave organického odpadu – je ním detritový potravný reťazec, v ktorom sú produkty odpadu zdrojom energie a živín pre ďalšie typy organizmov, rozkladače. **Export entropie ekosystémom sa následne zredukoval na odpadové teplo,** ktoré je v podobe žiarenia dlhých vlnových dĺžok (IR žiarenia) emitované do vesmíru.

Práve v dôsledku schopnosti recyklácie živín sú biologické a ekologické systémy schopné za podmienky prísunu energie zvonku dlhodobo budovať, udržiavať a reprodukovať vysoko usporiadané štruktúry a procesy, ktoré sú základom ekosystémových funkcií a tým aj služieb poskytovaných civilizácii.

Industriálne systémy napodobňujú ekosystém snahou triediť odpad a recyklovať ho ako druhotnú surovinu. Avšak nesmieme zabúdať, že na recykláciu je tiež nutné vynaložiť energiu. Keďže súčasťou každej transformácie energie je aj produkcia entropie, vyplýva z toho, že **devastáciu planéty by nezastavilo objavenie nového zázračného zdroja energie**. Zvýšenou transformáciou energie by sa totiž súčasne zvýšila antropogénna produkcie entropie a tým aj rozsah a rýchlosť devastácie ekosystémov v dôsledku ďalšieho rastu čerpania prírodných zdrojov a antropogénnej premeny krajiny, vrátane likvidácie, fragmentácie a degradácie jej ekosystémov. Ich devastácia je pritom už dnes alarmujúca.

6.3 Adaptívne vývojové cykly ekologického systému

Ekologické systémy sú zložité adaptívne systémy (CAD – *complex adaptive systems*, LEVIN 1998). K ich charakteristikám patrí **inherentne vysoká dynamika** a neustála zmena (SLAVÍKOVÁ 1986), čo im umožňuje prežívať aj v meniacom sa prostredí. Základom ich dynamiky sú početné a rozmanité interakcie prvkov systému, ktoré sa spájajú do procesov a prostredníctvom tokov energie, hmoty a informácií **integrujú prvky** do hierarchicky vyššieho systému (napr. vnútrodruhové a medzidruhové interakcie vedú k integrácii jednotlivých miestnych populácií do spoločenstva, ktoré má svoje špecifické emergentné vlastnosti ako je napr. druhová diverzita, konektivita, reziliencia, ale aj krása).

Prostredníctvom zreťazenia interakcií do autoorganizačných procesov vzniká zo zdanlivo chaotických aktivít prvkov nižších hierarchických úrovní systému zložité usporiadanie jeho disipatívnych štruktúr aj procesov. V tomto kontexte je významná ďalšia teória odvodená z nerovnovážnej termodynamiky živých systémov. Ide o **model adaptívneho vývojového cyklu** dynamického ekologického systému (resp. aj sociálno-ekokologického systému), označovaný aj ako **Hollingov cyklus** (HOLLING 2001, 2004), ktorý prináša nové významné vhľady do jednotlivých fáz životných dráh týchto systémov.

6.3.1 Hollingov adaptívny vývojový cyklus a jeho fázy

Hollingov model adaptívneho cyklu ekologického systému vychádza z pozorovaní a štúdií dynamiky ekosystémov, pričom upriamuje pozornosť na charakteristiky a zákonitosti striedania jeho fáz. **Adaptívny cyklus zahŕňa dynamické striedanie štyroch fáz:** dve dlhodobé fázy rastu, využívania (r) a konzervácie (K), a dve krátkodobé fázy kolapsu, uvoľnenia energie (Ω), v ktorej je rozrušenie starého usporiadania základom obnovy aj inovácie usporiadania systému v reorganizačnej fáze (α) (obr. 6.6.a, HOLLING 2001, 2004). Pomocou tohto modelu môžeme opísať životné cykly rôznych organizačných úrovní ekologických, sociálno-ekologických, ale aj sociálnych a ekonomických systémov.

Dlhodobé fázy: rastová fáza r a konzervačná fáza K

Fáza rastu r je exploatačná, rastová fáza, ktorú charakterizuje maximálny rast. Charakterizuje ju vysoká

medzidruhová konkurencia a kolonizácia neobsadených území eurytopnými druhmi (r-stratégmi). V prípade prírodného ekosystému, napr. lesa, táto fáza zodpovedá štádiám primárnej alebo sekundárnej sukcesie, v ktorých sa postupne akumuluje energia v ekosystéme (vo forme biomasy a živín) a táto zmena energetickej bilancie nevyhnutne vedie k striedaniu sukcesných fáz, ktoré vrcholí klimaxom. **Rastová fáza teda zodpovedá ekologickej sukcesii**, ktorá je prejavom prirodzenej tendencie ekologických systémov zvyšovať svoju zložitosť. Každé sukcesné štádium sa pritom vyznačuje inou úrovňou komplexity, ktorá v zmysle princípu maximálneho výkonu narastá smerom ku klimaxu (HOLLING 2001, 2004).

V druhej fáze, **fáze konzervácie (fáze zachovania) K** sa v ekosystéme ďalej akumuluje energia a hmota, aj keď prírastky sú už nižšie ako v rastovej fáze a v dôsledku tejto akumulácie sa vytvárajú nové niky (HOLLING 2001). Presadzujú sa stenotopné druhy (K-stratégovia) a populácie jednotlivých druhov postupne dosahujú limity ekologickej únosnosti (nosnej kapacity prostredia, najvyššej ekologicky prípustnej miere využívania ekologického systému), systém prechádza do klimaxového štádia.

Vysoká účinnosť disipatívnych procesov v klimaxovom štádiu spôsobuje minimálny alebo žiadny prírastok biomasy, avšak súčasne sa v tejto fáze v ekosystéme uchováva (konzervuje) najvyššie množstvo kvalitnej energie preto sa nazýva fázou konzervácie resp. fázou zachovania (HOLLING 2001, 2004). Klimaxové štádium charakterizuje skutočnosť, že takmer celé množstvo za rok vytvorenej biomasy sa v ňom predýcha živými zložkami ekosystému, vrátane detritu, čo umožňuje ustálenie dynamickej rovnováhy pri ktorej je čistý ročný prírastok biomasy blízky nule a podiel respirácie k produkcii sa blíži k 1 (MÍCHAL 1994; SLAVÍKOVÁ 1986).

Krátkodobé fázy: fáza uvoľnenia Ω a reorganizácie α

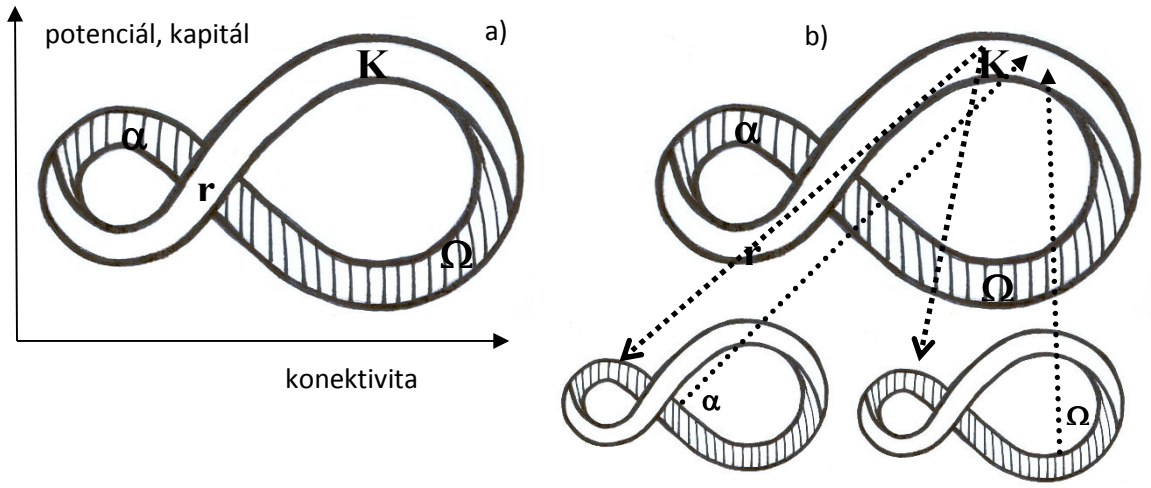
Ani klimax nie je trvalým štádiom, ale iba ďalšou fázou vývojového cyklu ekologického systému (daný model možno aplikovať aj na sociálne a sociálno-ekologické systémy). Súčasťou jeho dynamiky sú aj zvonku pôsobiace náhle prírodné narušenia (disturbancie) jeho štruktúry a funkcií. V prípade lesného ekosystému k takýmto narušeniam patria napr. lesné požiare, víchrice a nimi spôsobené polomy, záplavy, dlhé periódy sucha a vlny extrémnych horúčav alebo extrémneho chladu, vnútrozemské aj pobrežné záplavy a iné.

Na konzervačnú fázu K tu preto nadväzuje pomerne rýchla **fáza kolapsu Ω**, správnejšie fáza uvoľnenia, ktorá náhle rozrušuje existujúce usporiadanie prvkov systému vybudované vo fázach r a K. Podľa HOLLINGA (2004) je však táto deštrukcia „tvorivá“ nakoľko sa v jej priebehu uvoľňuje vysoko kvalitná energia, ktorá sa naakumulovala v priebehu sukcesie a klimaxu (napr. energia viazaná v dreve lesného ekosystému). Fáza uvoľnenia naakumulovanej energie umožňuje jej využitie ďalšími organizmami.

Následne nastane pomerne rýchla reorganizácia systému vo **fáze reorganizácie α**, v ktorej sa vytvoria podmienky pre vstup systému do novej exploatačnej fázy r a celý cyklus sa opakuje (HOLLING 2004). Hollingov cyklus teda prichádza s novým chápaním prírodných narušení ako „tvorivej deštrukcie“ (CARPENTER & GUNDERSON 2001), ktorá vytvára podmienky pre reorganizáciu a ďalší vývoj systému.

Z dlhodobého hľadiska disturbancie postupne dokonca môžu zvyšovať rezilienciu systému – schopnosť odolávať disturbanciám pri súčasnom zachovaní štruktúry, emergentných vlastností a hlavných funkcií systému. Tu však treba poznamenať, že niekedy príde k prírodným narušeniam ešte skôr ako ekosystém dosiahne fázu K, ale to sa stáva relatívne zriedka a takéto narušenia majú tiež menšie dôsledky (v dôsledku nižšieho objemu energie naakumulovanej v biomase v nižších sukcesných štádiách).

Na obr. 6.8.a. je náčrt tohto cyklu v prostredí dvoch osí: vertikálna os označuje **potenciál systému** – nakumulovanú energiu v podobe biomasy a živín a tým aj potenciál pre ďalší vývoj. Horizontálna os vyjadruje vnútornú konektivitu, prepojenosť prvkov systému, ktorá je priamo úmerná počtu interakcií v systéme a spravidla rastie s diverzitou prvkov systému. Táto konektivita vyjadruje aj schopnosť „vnútorného riadenia“, napriek pôsobeniu vonkajších síl (HOLLING 2001).



Obr. 6.8.a) Adaptívny vývojový cyklus ekologického systému. 6.8.b) koncepcia panarchie: vnáranie cyklov nižších hierarchií do vyšších hierarchií. *Upravené podľa:* GUNDERSON & HOLLING 2009.

Z ilustrácie vidieť, že potenciál systému sa zvyšuje v priebehu jeho rastovej fázy r. Súčasne s tým sa však znižuje reziliencia systému voči jeho narušeniam, až konzervačnú fázu K preruší narušenie, ktoré spustí fázu uvoľnenia energie Ω, ktorá je pomerne rýchla a vedie k reorganizačnej fáze α. Striedanie týchto fáz je dôležité pre udržanie a obnovu štruktúry a funkčnosti ekologického (alebo sociálneho) systému (HOLLING 2001). Zabezpečuje jeho charakteristické usporiadanie, nenarušenosť a úplnosť, jeho vitalitu (životaschopnosť), ale v konečnom dôsledku posilňuje aj kľúčové emergentné vlastnosti ekosystému, predovšetkým biodiverzitu, konektivitu a reziliencu – a tým aj jeho ekologickú integritu.

6.3.2 Ekologický význam prírodných narušení a koncepcia panarchie

Biocenózy, ekosystémy a krajinu formujú štyri skupiny činiteľov (TURNER et al. 2001): gradienty abiotických podmienok, interakcie organizmov, prírodné narušenia a vpylyvy človeka, osobitne formy a spôsoby využívania krajiny. **Prírodné narušenia – disturbancie**, sú relatívne náhle, prevažne náhodné, avšak periodicky sa opakujúce extrémne udalosti (napr. veterné smršte a nimi spôsobené polomy, svahové zosuvy, povodne, požiare, dlhotrvajúce suchá a iné), ktoré narúšajú v danom čase existujúcu štruktúru populácií a spoločenstiev, ekosystémov a krajiny, výrazne menia ekologické procesy, abiotické podmienky a tým dostupnosť prírodných zdrojov pre organizmy (PICKETT & WHITE 1985).

Ekologický význam prírodných narušení

Model adaptívneho vývojového cyklu nám osvetľuje aj **ekologický význam prírodných narušení (prírodných disturbancií).** Ich hybnou silou je akumulácia energie (napr. na styku tektonických platní, v tropickej cyklóne alebo energie viazanej v dreve lesného porastu), čím sa mení energetická bilancia ekosystému. Ekologický systém na vyššiu dostupnosť voľnej energie reaguje tvorbou nových, zložitejších štruktúr, ale tiež zvyšovaním zložitosti svojho správania (v klimaxovom ekosystéme sa podstatná časť fotosyntézou transformovanej energie predýcha). Akumulovaná energia sa skôr či neskôr musí uvoľniť, neostane nevyužitá, v ekosystéme je po disturbancii k dispozícii ďalším organizmom.

Porozumieť ekologickému významu prírodných narušení je dôležité, pretože vlastníci, nájomcovia a správcovia pozemkov (najmä lesov, lúk a pasienkov) síce zväčša deklarujú svoj záujem chrániť prírodu, avšak vzhľadom k všeobecne nízkemu poznaniu štruktúry a dynamiky ekosystémov, ako aj významu ich biodiverzity si iba zriedka uvedomujú negatívne dôsledky svojich vlastných postupov.

Napr. v lesnom hospodárstve, v súčasnosti dokonca aj v chránených územiach s nižším ako 5. stupňom ochrany v prípade prírodných disturbancií prevláda asanačný prístup, ktorého prejavom sú početné a rozsiahle holoruby po tzv. náhodných (neplánovaných) ťažbách. V podstate to znamená, že na

prírodnú disturbanciu „nasunieme“ ďalšie narušenie, tentoraz antropogénne (obr. 6.9 b). K nepriaznivým dôsledkom takéhoto prístupu patrí ďalšie rozrušenie prirodzených abiotických a biotických procesov, redukcia biologického dedičstva nutného pre reorganizačnú fázu ekosystému, výrazný úbytok biodiverzity pri veľkoplošnej ťažbe, narušenie prirodzenej obnovy populácií rastlín a živočíchov a často aj nižšia reziliencia budúceho lesa voči disturbanciám a nižšia rezistencia voči inváznym druhom (LINDENMAYER et al. 2017).

Ak však prírodné disturbancie vnímame ako spúšťač procesov uvoľnenia energie naakumulovanej v biomase, tak pohľad na tieto disturbancie sa zásadne mení (CARPENTER & GUNDERSON 2001). Disturbancia samozrejme rozruší existujúcu organizáciu ekosystému, ale ňou spustené procesy uvoľnenia energie vedú k jej vyššiemu toku cez detritové reťazce, čo je dôležité pre obnovu a posilnenie ník rozkladačov a ďalších druhov týchto reťazcov. To znamená dočasnú zmenu štruktúry bioty, avšak prítomné biologické dedičstvo (napr. semenná banka v pôde a rôzne mikrobiotopy) sa aktivuje a podieľa na reorganizácii a obnove ekosystému (obr. 6.9.b, FRANKLIN et al. 2007; SABO & TOPERCER 2012; LINDENMAYER et al. 2017).

Malé a stredné disturbancie takto vedú k reorganizácii a obnove systému, pričom zvyšujú aj jeho ekologickú stabilitu a tým aj reziliencu voči budúcim disturbanciám (VOLOŠČUK 2001; SPLECHTNA & GRATZER 2005). Problém je, že v intenzívne obhospodarovanom lese sa prirodzené autoorganizačné a autoregulačné mechanizmy, ktoré sú kľúčom k spontánnej obnove ekosystému, aktivujú podstatne ťažšie (chýba napr. pôvodné biologické dedičstvo). Cestou do budúcnosti preto je aj lesné hospodárenie viac priblížiť k prírode blízkemu obhospodarovaniu lesa (SANIGA & BRUCHÁNIK 2009).

Obr.6.9. a) Holoruby v Bocianskej doline, Národný park Nízke Tatry 2017, *Foto:* Peter Sabo, 2017.
b) Sekundárna sukcesia v Národnej prírodnej rezervácii Šrámková, Národný park Malá Fatra. Túto sukcesiu predchádzalo pomerne rozsiahle prírodné narušenie, dva veterné polomy v roku 2002, v celkovom rozsahu 5 000 m^3. Tento polom nebol vyťažený, územie bolo ponechané na samovývoj. Na obrázku je vidieť dobré zmladenie buka lesného (*Fagus sylvatica*). *Foto:* © Peter Urban, 2017.

Koncepcia panarchie

Hollingov adaptívny cyklus zvyšuje porozumenie hierachickému usporiadaniu biologických a ekologických systémov. Ich hierarchia totiž nie je iba hierarchiou štruktúr, vnárania sa prvkov nižších úrovní do systémov vyšších úrovní (napr. populácií druhov do ekosystému), ale súčasne znamená aj hierarchiu vnárania sa procesov do vyšších úrovní, ako znázorňuje **Hollingov model panarchie** (GUNDERSON & HOLLING 2009; obr. 6.8.b). Podobne ako sa živé systémy nižších hierarchických úrovní vnárajú do systémov vyšších úrovní, tak aj samotné Hollingove adaptívne cykly systémov nižších hierarchických úrovní (napr. jednotlivých stromov v lese) sa integrujú do adaptívnych cyklov hierarchicky vyšších systémov.

Model panarchie rozširuje pôvodný Hollingov model adaptívneho cyklu na vyjadrenie dynamiky živých systémov, v rámci ktorej medzi sebou interagujú adaptívne vývojové cykly rôznych hierarchických úrovní. Súčasne podčiarkuje paradigmatický posun smerom od predstavy stabilných ekosystémov,

k ich stále sa meniacej, „prúdiacej mozaike biotopov“ v krajine (PLESNÍK 2010). Ilustruje tiež, že základom ekologickej rovnováhy a reziliencie vyšších hierarchických úrovní je vysoká prirodzená dynamika nižších úrovní (napr. v prípade lesa porastov stromov na malých plôškach). Toto poznanie by malo byť kľúčom aj k novému vnímaniu ekologického významu prírodných disturbancií v lesných ekosystémoch a k hľadaniu ciest udržateľného, prírode blízkeho manažmentu lesov (URBAN et al. 2018; URBAN 2019).

V tomto kontexte **sa ekologická integrita ekologického systému prejavuje ako „plynúca ekologická rovnováha“**. Platí, že čím má ekosystém vyššiu integritu, tým je vyššia aj jeho rezistencia a reziliencia voči narušeniam zvonku, ktoré závisia od zdanlivo chaotickej dynamiky nižších hierarchických úrovní. Toto zistenie vedie k významným aplikáciám koncepcií zložitosti a integrity vo vzťahu k manažmentu ekosystémov v kontexte súčasných veľkých globálnych environmentálnych výziev, ako je aj prebiehajúca zmena klímy, úbytok biodiverzity, dramatická zmeny krajinnej pokrývky a štruktúry a ďalšie.

Aplikujúc Schrödingerove postrehy o tom, čo je život (SCHNEIDER & Kay 1994) môžeme zhrnúť, že aj v prípade adpatívnych vývojových cyklov najrôznejších ekosystémov platí, že usporiadanie na hierarchicky vyššej úrovni živého systému sa rodí z vysokej dynamiky a zdanlivého chaosu na jeho nižšej úrovni.

Aplikácia koncepcie panarchie pri výskume ekosystémov kultúrnej krajiny

Kultúrna krajina predstavuje špecifický sociálno-ekologický systém, ktorého štruktúru, kompozíciu, dynamiku aj osobitý vzhľad utvára synergia procesov autoorganizácie a antropoorganizácie. Aj v kultúrnej krajine môžeme využiť teóriu adaptívnych cyklov a panarchie, ako dosvedčuje aj tento príklad:

Štúdia autorov SOANE et al. (2012) sa týka pastorálneho ekosystému v talianskej alpínskej provincii v údolí Ledro, na stráňach masívu Monte Tremalzo (1974 m n.m.). Tento sociálno-ekologický systém, nazývaný Malga zahŕňa horské aj vysokohorské porasty, tradične obhospodarované už od 15. storočia.

Druhovo najbohatšie sú tu travinné spoločenstvá na vápencovom podklade. Rastie tu aj viacero endemitov, napr. v skalných štrbinách zakoreňuje silenka *Silene elisabethae*. Talianski vedci pre systém Malga určili tri úrovne panarchie. Najnižšia zodpovedá piatim tu identifikovaným európsky významným vegetačným jednotkám, stredná predstavuje ekosystém trávnych porastov a najvyššou úrovňou je adaptívny cyklus krajiny otvorených riedkolesov (*woodlands*) prerušovaných trávnymi porastami.

Prírodný kapitál (potenciál) v prípade všetkých troch cyklov nepredstavuje iba biomasa a živiny, ale aj primerané zastúpenie hodnotných druhov (definovaných podľa sústavy Natura 2000, v ktorej je územie zaradené). Rast konektivity je spojený najmä s rastom druhového bohatstva. Štúdia potvrdila, že ekologické procesy na nižších úrovniach hierarchie sú rýchlejšie a intervaly adaptívnych cyklov sú kratšie.

Zmeny adaptívnych cyklov v skúmanom území úzko súvisia s manažmentovými postupmi a zásahmi farmárov alebo naopak, so zanechaním obhospodarovania pastvín a nástupom sukcesie (pod hornou hranicou lesa), ako aj s ďalšími narušeniami zvonku systému. Zistilo sa, že rezistencia voči prírodným aj antropogénnym narušeniam tohto pastorálneho systému rastie smerom k vyšším úrovniam panarchie.

Cieľom uvedenej štúdie bolo určiť tendencie vývoja vegetácie v alpínskej provincii, jej narušenia a navrhnúť taký manažment ekosystémov, ktorý posilňuje prírodný kapitál, prítomnosť hodnotných cieľových druhov, aj biodiverzitu. V prípade travinných porastov sa vhodným režimom javí ekosystémy menej zaťažujúca, tzv. ľahká „ochranárska pastva“, ktorá travinné biotopy chráni pred zarastaním, súčasne však zvyšuje aj ich biodiverzitu a podporuje prítomnosť a hojnosť hodnotných (cieľových) druhov. Udržateľnosť systému Malga spočíva v kombinácii zabezpečenia ekonomických benefitov pre farmárov pri súčasnom rešpektovaní požiadaviek ochrany prírody.

Z uvedeného príkladu vidieť, že napriek náročnosti identifikácie adaptívnych cyklov v konkrétnej kultúrnej krajine má takéto úsilie význam, pretože prináša nové vhľady do fungovania sociálno-ekologických systémov a postupov ich udržateľného manažmentu. Tieto nové vhľady pomáhajú zainteresovaným stranám (ako sú napr. vlastníci a užívatelia pozemkov, miestni obyvatelia, podnikatelia, orgány štátnej správy a miestnych samospráv) nachádzať optimálny manažment ekosystémov (v zmysle TUSES).

Upravené podľa: KAY 2000; OSTROM 2009; SOANE et al. 2012

V druhom diele učebnice o systémovej ekológii sa budeme viac venovať novým systémovým vhľadom, ktoré už prenikajú do koncepcií súčasnej ekológie v oblastiach populácií, spoločenstiev, ekosystémov a ich dynamiky. Podrobnejšie tiež pokúsime pozrieť na tu iba naznačenú dynamiku posúvajúcej sa mozaiky „medzier" prekrývajúcich sa vývojových cyklov lesa v jeho rôznych plôškach (*gap dynamics*), ktorá je základom ekologickej integrity lesného ekosystému ako celku.

Zhrnutie kapitoly 6

Od ekologickej zložitosti k ekologickej integrite

1) Vychádzajúc z teórie zložitosti a z typológie vzťahov v ekosystéme a krajine, za **tri základné piliere ekologickej komplexity** sme navrhli: 1) Ekologicko-funkčný rozmer vystihuje schopnosť spoločenstiev, ekosystémov a krajín disipovať slnečnú energiu, ktorá rastie so zvyšovaním zložitosti systému. 2) Priestorovo-štrukturálny rozmer na báze dvoch premenných: diverzita prvkov v systéme (napr. druhová diverzita, heterogenita abioty) a ich konektivita. 3) Historicko-časový rozmer reflektuje vysokú dynamiku a históriu ekologického systému. V ekosystéme ide napr. o podiel, kompozíciu, prepojenia a význam reliktných plôšok, v krajine napr. o mozaiku a vplyvy plôšok historickej krajinnej štruktúry.
2) Podľa **koncepcie dynamickej nerovnováhy ekosystému** táto v priebehu jeho životného cyklu prevažuje. Dynamiku ekosystému ovplyvňuje synergia pôsobenia vysokého počtu vnútorných aj vonkajších väzieb a faktorov, ktoré vedú k postupnosti kvázi-rovnovážnych stavov systému. Vysokú dynamiku prírody vystihuje metafora prúdiacej mozaiky biotopov. Základom vývoja a pretrvávania živých systémov je kombinácia pevných biologických a ekologických pravidiel a súčasne vysokej dynamiky, vrátane náhodnosti. To platí tak pre ontogenetickú úroveň, ako aj pre evolučný vývoj.
3) **Ekologický systém má integritu** ak zachováva svoju prirodzenú úroveň zložitosti, schopnosť autoorganizácie a potrebnú diverzitu v rámci jeho štruktúr a funkcií. Za dôležité atribúty tejto integrity sa považuje najmä úplnosť a neporušenosť ekologického systému, primeraná zložitosť aj autenticita jeho usporiadania, ako aj schopnosť udržiavať optimálne a prirodzené druhové zloženie.
4) **Ekologickú integritu hodnoteného ekosystému môžeme kvantifikovať** ako pomyselnú „ekologickú vzdialenosť" hodnoteného ekosystému k porovnateľnému referenčnému vzoru. Čím je táto vzdialenosť nižšia, tým vyššia je integrita a naopak. K referenčným ekologickým systémom, ako normatívom pre porovnávanie s EI patria predovšetkým charakteristiky prírodných ekosystémov a krajín, často označované ako divočina, ale aj tradičných (historických) poloprírodných ekosystémov.
5) **Ekologická komplexita a integrita sú súčasťou prírodného kapitálu.** Prosperita ľudskej spoločnosti preto závisí aj od udržania zložitosti a integrity ekologických systémov rôznych hierarchií. Nestačí chrániť iba organizmy a ekosystémy ako prírodné objekty, ale treba tiež udržať početné a rozmanité interakcie a procesy, ako súčasť autopoietických sietí života. Ekologické hranice úbytku komplexity metapopulácií, ekosystémov, ekoregiónov aj Zemského ekosystému, po ktorých prekročení môže dôjsť k zásadným nevratným zmenám týchto systémov je osobitne ťažké až nemožné odhadnúť. Preto je nutné rešpektovať existujúcu komplexitu ako základ integrity týchto systémov.

Nerovnovážna termodynamika živých systémov

6) Pri hľadaní definície života je vhodné oprieť sa o definovanie **prejavov živého systému**, ku ktorým patrí vytváranie a využívanie organických zlúčenín, transformovanie energie v procesoch fotosyntézy a jej využívanie v procesoch metabolizmu, udržiavanie vnútorného prostredia prostredníctvom homeostázy, rast, vývoj, dospelosť a starnutie, reprodukcia a schopnosť adaptácií k zmenám prostredia. Z pohľadu termodynamiky život znamená „*vznik usporiadania z usporiad*ania" (napr. pri rozmnožovaní), ale súčasne aj „*vznik usporiadania z neusporiadania"* (napr. pri procesoch asimilácie).
7) **Disipatívne štruktúry** sú fyzické štruktúry termodynamicky otvorených systémov, ktoré spontánne vytvárajú a udržiavajú svoje usporiadanie transformáciou a využívaním energie, ktorá vstupuje do systému. Na nich realizované procesy využívajú dostupnú energiu a transformujú ju na energiu nižšej kvality, preto

sa nazývajú **disipatívne procesy**, pričom do svojho okolia exportujú menej kvalitnú, rozptýlenú (disipovanú) energiu, čím zvyšujú jeho entropiu. Príkladom takýchto štruktúr a procesov sú všetky známe živé systémy, ale napr. aj globálna cirkulácia ovzdušia, morské prúdy, systémy cyklón a anticyklón, atď.

8) Základom **koncepcie nerovnovážnej termodynamiky adaptovanej pre živé systémy** je predstava že každý tok kvalitnej energie do systému ho vychyľuje od bodu jeho termodynamickej rovnováhy s obklopujúcim prostredím. Aby sa s takto vzniknutým energetickým gradientom vyrovnal, biologický aj ekologický systém musí doň vstupujúcu energiu premeniť a rozptýliť (disipovať). Čím vyšší je prísun energie, tým viac jej môže využiť na rozvíjanie vnútorného usporiadania v podobe nových disipatívnych štruktúr a disipatívnych procesov. Ich zložitosť teda súvisí s veľkosťou prísunu energie. Každý živý systém má **prirodzenú úroveň zložitosti**, komplexity, pri ktorej je jeho správanie optimálne a vitalita vysoká.

9) **Miera účinnosti disipácie energie indikuje úroveň organizácie,** komplexity živého systému. Táto je v ekosystéme zreteľná predovšetkým na úrovni organizácie jeho vegetácie, ako fyziognomicky najdominantnejšej zložky. Funkčnú zložku ekologickej komplexity môžeme hodnotiť s využitím meraní bilancie slnečného žiarenia alebo aj povrchovej teploty ekosystémov – čím vyššia disipácia slnečnej energie resp. jej využitie na budovanie zložitejších štruktúr, tým bude ekosystémom zachytený, transformovaný a využitý tok energie vyšší a povrch ekosystému bude chladnejší.

10) **Radiačnú bilanciu ekosystému**, t.j. čistú ním transformovanú energiu R_n vyjadruje vzorec: $R_n = Q_{in} * (1 - \alpha) - (L_{out} - L_{in})$, kde Q_{in} je globálny tok krátkovlnného slnečného žiarenia k povrchu ekosystému, α je albedo povrchu, $L_{out} = \varepsilon\sigma T^4$ je dlhovlnné IR žiarenie emitované povrchom, L_{in} je IR žiarenie vyžiarené smerom k tomuto povrchu skleníkovými plynmi atmosféry. Vzťah medzi tokom energie emitovanej povrchom ekosystému a jeho teplotou definuje Stefanov-Boltzmannov zákon**:** $L_{out} = \varepsilon\sigma T^4$, kde L_e je tok emitovaného IR žiarenia (vo $W.m^{-2}$), ε je emisivita povrchu, σ je Stefan-Boltzmanova konštanta ($\sigma = 5{,}67 * 10^{-8}$ $W.m^{-2}.K^{-4}$) a T je absolútna teplota povrchu v Kelvinoch.

11) **Vysoká zložitosť tropických dažďových pralesov** potvrdzuje tézu, že ide o spontánnu odpoveď živého systému na relatívne stabilné vonkajšie prostredie a kontinuálny prísun kvalitnej energie, čo súvisí s tendenciou systému maximálne efektívne využiť dostupnú energiu a ďalšie prírodné zdroje zvyšovaním zložitosti svojho usporiadania (princíp maximálneho výkonu). Mimoriadne vysoká komplexita života v tropickom pralese sa vytvorila napriek tomu, že pôda pralesa nepatrí k veľmi úrodným. Nedostatok živín v pôde, ktoré sú z nej vymývané silnými dažďami tu nahrádza rýchlejší rozklad odmuretej organickej hmoty a tým zrýchlený obeh živín.

12) Pojem **holarchia** označuje hierarchické usporiadanie, ktoré vzniká vnáraním prvkov danej úrovne do zložitejších systémov, pričom však okrem vzťahov hierarchie súčasne zdôrazňuje aj recipročné vzťahy koordinácie medzi rôznymi hierarchickými úrovňami. Koncepcia SOHO systémov zahŕňa autoorganizáciu a nelinearitu správania systému, holarchické vnáranie holónov do hierarchicky vyšších systémov, vysokú dynamiku, ako aj viacnásobné rovnovážne stavy.

13) **Rast entropie okolia sprevádza transformáciu energie v systéme.** V prípade trofických reťazcov má entropia formu odpadového tepla, úbytku živín v pôde a exkrementov živočíchov. Industriálne systémy napodobňujú ekosystém snahou triediť odpad a recyklovať ho ako druhotnú surovinu. Avšak na recykláciu je nutné vynaložiť energiu. Keďže súčasťou transformácie energie je produkcia entropie, je pravdepodobné, že devastáciu planéty by nezastavilo objavenie nového zázračného zdroja energie. Naopak, je pravdepodobné, že antropogénna entropizácia Zemského systému by sa tým iba zrýchlila.

Adaptívne vývojové cykly zložitého živého systému

14) **Hollingov model adaptívneho cyklu** ekologického systému upriamuje pozornosť na charakteristiky a zákonitosti striedania štyroch fáz: dve dlhodobé fázy rastu (r) a konzervácie (K), a dve krátkodobé fázy uvoľnenia energie (Ω) a reorganizácie (α). Pomocou nich môžeme opísať životné cykly rôznych biologických, ekologických ale aj sociálnych systémov (napr. vzťah jednotlivých fáz adaptívneho cyklu lesného ekosystému k malému aj veľkému cyklu lesa približujú URBAN et al. 2018).

15) **Dlhodobé fázy adaptívneho cyklu** sú fáza exploatácie a rastu, označovaná r a fáza konzervácie, označovaná K. Napr. v prípade prírodného lesa fáza r zodpovedá štádiu dorastania počas primárnej alebo sekundárnej sukcesie, kedy sa pomerne rýchlo akumuluje energia v ekosystéme (vo forme biomasy a živín), čo vedie k striedaniu sukcesných fáz a k rastu zložitosti systému až ku klimaxu. Pritom sa vynárajú jeho nové, emergentné vlastnosti, aj určité vzorce (*patterns*) jeho správania. Fáza K zodpovedá v lese štádiu optima resp. klimaxu, v ktorom sa v systéme uchováva (konzervuje) najviac kvalitnej energie.

16) **Krátkodobé fázy adaptívneho cyklu** sú fáza kolapsu, uvoľnenia energie Ω, ktorá rozrušuje existujúcu organizáciu systému a fáza pomerne rýchlej reorganizácie systému α. V prípade prírodného lesa fáza Ω môže predstavovať veterný polom alebo silný atak lykožrúta či iného hmyzu, kedy dôjde k uvoľneniu energie nahromadenej v zásobe dreva. Fáza reorganizácie α čerpá najmä z genetickej informácie zachovanej v posmršťových biotopoch, v semennej banke v pôde a z uvoľnenej energie, ktorá sýti detritové reťazce. Hollingov cyklus prichádza s inovatívnym chápaním prírodných disturbancií ako „tvorivej deštrukcie“, ktorá vytvára podmienky pre reorganizáciu a inovatívny vývoj systému.

17) Hollingov model reflektuje vysokú dynamiku ekologických systémov rôznych hierarchií. Demonštruje a umožňuje skúmať nielen hierarchiu štruktúr, ale aj hierarchiu procesov, čo znázorňuje **koncepcia panarchie**. Adaptívne cykly ekologických systémov nižších hierarchických úrovní sa tu integrujú do adaptívnych cyklov hierarchicky vyšších systémov. Príkladom je vnáranie kratších cyklov vegetačných jednotiek európskeho významu do dlhších cyklov ekosystému trávnych porastov, ktorý je súčasťou ešte vyššieho a dlhšieho adaptívneho cyklu riedkolesa v rámci sociálno-ekologického systému Malga.

18) Z koncepcie panarchie vyplýva, že základom ekologickej rovnováhy vyšších hierarchických úrovní je paradoxne práve vysoká prirodzená dynamika nižších hierarchických úrovní. Príkladom je dynamika malých plôšok lesných porastov alebo jednotlivých stromov v pralese alebo prírodnom lese, ktorá prispieva k ekologickej rezistencii a reziliencii celku pralesa (alebo prírodného lesa).

Otázky

1) Charakterizujte tri základné piliere (dimenzie) ekologickej zložitosti.
2) Aký je rozdiel medzi koncepciou ekologickej stability a nerovnovážnou perspektívou?
3) Charakterizujte koncepciu ekologickej integrity, jej hlavné atribúty a perspektívy.
4) Ako súvisí ochrana integrity ekosystémov s potrebou uchovať prírodný kapitál?
5) Vysvetlite koncepciu nerovnovážnej termodynamiky živých systémov.
6) Čo sú to disipatívne štruktúry a disipatívne procesy? Uveďte príklady.
7) Čo sú to bifurkácie? Vysvetlite koncepciu SOHO systémov.
8) Vysvetlite princíp maximálneho výkonu resp. maximálnej účinnosti na príklade pralesa.
9) Charakterizujte štyri fázy adaptívneho vývojového cyklu ekologického systému.
10) Čo je to panarchia a ako súvisí dynamika prvkov systému s jeho ekologickou rovnováhou?

Kritické zamyslenie

1) Aké sú podľa Vás prínosy a zápory koncepcií ekologickej stability vs. nerovnovážnej perspektívy?
2) Môže koncepcia nerovnovážnej termodynamiky živých systémov prispieť k objasneniu vzniku života?
3) Vedeli by ste nájsť iné príklady panarchie ako je ekosystém pralesa alebo prírodného lesa?

"*Všetci majú svoju cenu a každý prispieva k cene ostatných.*"

J. R. R. Tolkien

7 Revízia koncepcie udržateľnosti, ekosystémový prístup a otázky hodnotenia ekologickej zložitosti

Kým ekologická zložitosť vyjadruje stupeň organizácie ekologického systému, ekologická integrita ako jeho emergentná vlastnosť vyjadruje jeho celistvosť a neporušenosť, autenticitu jeho organizácie, vitalitu a funkčnosť. Tento aspekt treba mať na pamäti aj pri hodnotení antropogénnych vplyvov na ekosystémy. Zložitosť a integritu sa snaží reflektovať aj načrtnutá revízia koncepcie udržateľnosti na bio-fyzikálnom základe, hodnotenie ekosystémových služieb a vôbec ekosystémový prístup, ktoré v tejto kapitole približujeme. Ich priemet do hľadania riešení súčasných veľkých environmentálnych problémov zdôrazňuje obnovu, udržanie a ochranu prirodzených ekologických vzťahov a procesov v ekosystémoch. Príkladom je organické poľnohospodárstvo alebo lesné hospodárstvo reflektujúce postupujúcu zmenu klímy.

Ekologická zložitosť a krása ekosystémov

Biodiverzita, pestrosť tvarov, farieb, zvukov a vôní organizmov, ktoré obývajú zväčša druhovo bohaté prírodné, ale aj poloprírodné ekosystémy (napr. druhovo pestré lúky), oddávna priťahujú pozornosť botanikov, zoológov, ekológov aj turistov. V súčasnosti sú v EÚ už zadefinované aj biotopy európskeho významu a biotopy druhov európskeho významu, ktoré sú súčasťou sústavy Natura 2000. Na jednotlivé prírodné biotopy tejto sústavy sú viazané špecifické spoločenstvá rastlín, húb a živočíchov. Fascinujúca nie je iba ich biodiverzita, ale aj vysoká koherencia, schopnosť fungovať ako integrovaný celok.

Inštalácia snímačov na meranie bilancie krátko- a dlhovlnného žiarenia systému atmosféra – okraj cerového lesa. *Foto:* © Ľudmila Sabová, 2010.

Prírodné a poloprírodné ekosystémy – lesy a háje, lúky a pastviny, mokrade a jazerá, ale aj skalnaté stanovištia majú veľký ekologický aj kultúrny význam, ktorý je výrazom ich schopnosti poskytovať spoločnosti ekosystémové služby. Pre väčšinu turistov sú aj zdrojom jedinečnej krásy. Ekologický význam týchto ekosystémov indikuje ich štruktúra, kompozícia (druhová skladba), a zväčša aj dobrá schopnosť zachytiť, využiť a disipovať slnečnú energiu. Tieto ich vlastnosti sú výsledkom súhry fyzickej štruktúry a dynamiky ekosystémov a korelujú s ich ekologickou zložitosťou a integritou. V súčasnosti rastú snahy o kvantifikáciu týchto fenoménov (správnejšie ich čiastkových indikátorov, pretože hodnotiť zložitosť a integritu ľubovoľného ekosystému v ich úplnosti je nemožné).

V období 2009 až 2016 sme sa venovali hodnoteniu dvoch skupín čiastkových indikátorov ekologickej komplexity a integrity ekosystémov na viacerých miestach Slovenska. Prvá skupina, indikujúca funkčnosť, vychádza z kvantifikácie kapacity ekosystému zachytávať a disipovať slnečnú energiu. Druhá skupina vychádza z jeho druhovej skladby, v danom prípade diverzity cievnatých rastlín a z parciálnych indikátorov hemeróbie vegetácie. Hemeróbiu sme zisťovali prostredníctvom zisťovania výskytu a abundancie pôvodných, cudzích a synantropných druhov. Získané výsledky poukazujú na ekologický význam rôznych typov ekosystémov v krajine, aj na realizovateľnosť tohto spôsobu hodnotenia. O to viac, že prax v tomto prípade výrazne zaostáva za teóriou. Pre záujemcov o túto cestu hodnotenia zložitosti a integrity ekosystémov uvádzame v prílohe jednu z našich prípadových štúdií.

Upravené podľa: Kay 2000, 2001; Parrott 2010; Woodley 2010; Wurtzebach & Schultz 2016

7.1 Revízia koncepcie udržateľnosti

Ako už vieme z predošlých kapitol, k nepriamym hybným silám vysokej antropogénnej entropizácie Zemského systému patrí podceňovanie vysokej zložitosti živých systémov aj v environmentálnych štúdiách, čo vedie k strate vnímania súvislostí medzi zložitou štruktúrou, procesmi a správaním sa systémov. Narušenia ekosystémov a život udržiavajúcich procesov, funkcií a systémov sa pritom synergicky posilňujú a uplatňujú sa rôzne kladné spätné väzby (napr. zosilňovanie globálneho otepľovania v dôsledku topenia arktického a antarktického ľadu, topenia permafrostu a uvoľňovania metánu a iné). Úbytok biodiverzity a zmena klímy sa považujú za najväčšie environmentálne výzvy súčasnosti, avšak ich synergia s inými rozsiahlymi degradačnými procesmi (pozri kap. 2.2), napr. aj s nepriaznivými vplyvmi súčasného priemyselného poľnohospodárstva, sa v rozhodovacej sfére zatiaľ prevažne ešte nedoceňuje.

7.1.1 Tri základné argumenty pre revíziu koncepcie udržateľnosti

Ekologický argument upozorňuje, že rozvoj za cenu dezintegrácie život udržiavajúcich systémov je neudržateľný a nevyhnutne nás približuje ku hrane environmentálneho a tým aj civilizačného kolapsu. Platíme daň za to, že ekologické limity od miestnej po globálnu úroveň vytesňujeme z verejnej diskusie a politickí lídri stále opakujú iracionálnu mantru o „*udržateľnom ekonomickom raste*“, ako to tvrdia aj strategické „*udržateľné rozvojové ciele*“ Agendy 2030 (UN 2015). Do decíznej sféry ani verejnosti zatiaľ nedorazilo poznanie, že neustály rast spotreby materiálov a energií podľa druhého termodynamického zákona nutne vedie aj k rastu entropizácie ekosystémov a tým úbytku ekosystémových služieb.

Prioritou preto musí byť ochrana prírodného kapitálu a smerovanie „*silnej udržateľnosti*“, ktorá vylučuje jeho náhradu iným kapitálom, napr. finančným (Davies 2013). To znamená limitovať aj možnosti využívania biomasy ako obnoviteľného zdroja – či už ide o výruby pralesov za účelom zakladania plantáží palmy olejovej, výruby v lesoch mierneho pásma za účelom spaľovania dreva v elektrárňach alebo o pestovanie iných kultúrnych rastlín na produkciu biopalív (u nás najmä kapusty repkovej) na ornej pôde a pod.

Sociálny argument reflektuje, že sociálne asymetrický svet, v ktorom pokračuje honba za ziskami 1 % najbohatších na úkor miliárd ostatných (Pimentel et al. 2018) nevyhnutne zvyšuje entropizáciu spoločnosti, ktorá stráca víziu spoločne zdieľaných hodnôt, pretože ju vytláča rastúci tlak na osobný a skupinový prospech. Sociálna dezintegrácia zvyšuje početnosť a intenzitu sociálne patologických javov (napr. nárast agresivity, drogovej závislosti aj extrémizmu), ktoré zvyšujú tlak na demokratické inštitúcie.

Zabezpečenie základných ľudských potrieb (sloboda, bezpečie, živobytie, zdravie, vzdelanie, spravodlivosť a iné) má byť o dôstojnom živote pre všetkých. To znamená hľadať alternatívy voči konzumným trendom a skúmať aj náš vzťah k prírode aj spoločnosti (Kohák 1998; Keller D. 2010; Keller J. 2011). Vývoj spoločnosti nemôže byť udržateľný tam, kde sa tak deje na úkor udržania života alebo ľudskej dôstojnosti (napr. európski spotrebitelia nevidia alebo nechcú vidieť, že nízka cena niektorých odevov môže súvisieť s takmer otrockou prácou šičiek v Indii alebo v Bangladéši).

Etický argument hovorí, že cenou za nezmyselný blahobyt najbohatších je úbytok integrity ekologických, sociálnych a kultúrnych systémov (Kohák 1998). S tým nutne súvisí aj erózia vyšších etických princípov, ktoré vždy boli tmelom spoločnosti. Dedičstvo mechanickej paradigmy v kombinácii s panskou podobou antropocentrizmu vníma svet iba ako zásobáreň zdrojov pre ľudí. Zdá sa, že vnímať svet iba rozumom nestačí, dôležité je aj ľudské srdce, v ktorom krása prírody tká obrazy ideálov, ktoré nám pomáhajú rozlišovať, čo je dobré a čo je zlé. „*Preto som stále milovníkom lesov a lúk a hôr a všetkého, čo uzrieme na tejto zelenej zemi, celého bohatého sveta oka a ucha – toho, čo napoly tvoria i vnímajú a teší ma poznanie, že príroda a reč zmyslov sú stále kotvou mojich najčistejších myšlienok, že opatrujú, sprevádzajú a strážia moje srdce i dušu, celú moju morálnu bytosť.*” (Wordsworth in Clarke 1993).

Kam vedie dlhodobá ignorancia ekologických vzťahov v ekosystémoch a limitov ich využívania ilustrujeme na príklade priemyselného poľnohospodárstva, pričom sa sústredíme na jeho negatívne vplyvy na jednotlivé zložky životného prostredia, vrátane dramatického úbytku biodiverzity.

Príklad ekologického argumentu: nepriaznivé environmentálne vplyvy súčasného priemyselného poľnohospodárstva

Súčasťou veľkého zrýchlenia socioekonomického rozvoja bola aj tzv. **zelená revolúcia v poľnohospodárstve** v 60. až 80. rokoch minulého storočia (RAMANKUTTY et al. 2018). Išlo o výrazné spriemyselnenie konvenčného poľnohospodárstva, ktorého základom boli nové vysoko výnosné odrody obilovín (HYVs, *high yielding varieties*), vysoká mechanizácia, vysoké vstupy priemyselne vyrábaných hnojív a ďalších agrochemikálií (najmä pesticídov, stimulátorov rastu a defoliantov).

Zásadným prínosom zelenej revolúcie bolo výrazné zvýšenie globálnej poľnohospodárskej produkcie, napr. produkcia obilnín sa za posledných 50 rokov strojnásobila, kým rozloha, na ktorej sa pestujú, vzrástla iba o 30 % (PINGALI 2012). Na druhej strane, **spriemyselnenie poľnohospodárstva** viedlo k podobne prudkému nárastu jeho nepriaznivých vplyvov na pôdu, vodu, ovzdušie, biodiverzitu a na ekologickú stabilitu a integritu poľnohospodárskej krajiny.

Poľnohospodárska krajina zaberá viac ako 40 % rozlohy kontinentov (orná pôda 12 %), v Európskej únii (EÚ) 42 % a na Slovensku 48,5 %, orná pôda 28,7 %. Veľa pôdy sa stráca jej zábermi pre zástavbu a cestnú sieť, vrátane tzv. „pečatenia pôdy“, ktorým sa označuje jej pokrývanie nepriepustnými povrchmi (asfalt, betón), čím ju definitívne strácame. V EÚ sme v období 2000 – 2018 takto prišli o 14 049 km^2 poľnohospodárskej pôdy (RITCHIE & ROSER 2019; EC 2018; LIESKOVSKÁ & LÉNYIOVÁ 2019; EEA 2020).

Obr. 7.1. Ďalšia nová automobilka, tentoraz pri Nitre. Rozloha zapečatenej pôdy je približne 66 ha (budovy, komunikácie, parkovacie a iné spevnené plochy). *Foto:* © Monika Medovičová, 2020.

Podľa Organizácie OSN pre poľnohospodárstvo a výživu (FAO) v dôsledku rastu ľudskej populácie (prognózovaných 9,85 miliárd ľudí, PRB 2018) a jej spotreby, najmä rastu spotreby mäsa, aj morálnej nevyhnutnosti zlikvidovať hlad vo svete (v roku 2018 bolo až 820 miliónov ľudí chronicky podvyživených – prakticky hladujúcich), treba zvýšiť produkciu najmenej o 50 % (FAO 2019a; UNEP 2019). To je obrovská výzva a preto si zrekapitulujme environmentálne vplyvy priemyselného poľnohospodárstva.

Nepriaznivé vplyvy na pôdu

Fyzikálna degradácia pôdy: Najväčšími problémami poľnohospodárstva sú **erózia pôdy**, ďalej antropogénne zhutnenie (kompakcia) pôd alebo ich zamokrenie. Na veľkých lánoch polí rýchlosť erózie až rádovo prevyšuje prirodzenú rýchlosť erózie na zatrávnenej pôde. V roku 2012 bola globálna strata pôdy 35,9 miliárd ton (ESDAC 2020). V EÚ sa vodnou eróziou ročne stráca 2,46 ton pôdy z hektára, čo výrazne prevyšuje tvorbu novej pôdy; na Slovensku potenciálna vodná erózia ohrozuje 31,6 % a veterná erózia 4,5 % rozlohy poľnohospodárskej pôdy (LIESKOVSKÁ & LÉNYIOVÁ 2019; EEA 2020).

Antropogénne zhutnenie je dôsledkom silného mechanického tlaku na pôdu, najmä poľnohospodárskymi strojmi, vedie k zníženiu pórovitosti pôdy a tým aj jej schopnosti zadržiavať vodu, v zhutnenej pôde je aj menej živín, kompakcia pôdy ruší prirodzené pôdne agregáty a výrazne negatívne ovplyvňuje

pôdne organizmy. V EÚ kompakcia postihuje 23 % pôd. Iný problém, zamokrenie pôdy, nastáva najmä pri vysokej hladine podzemnej vody, často súvisí s budovaním veľkých vodných nádrží.

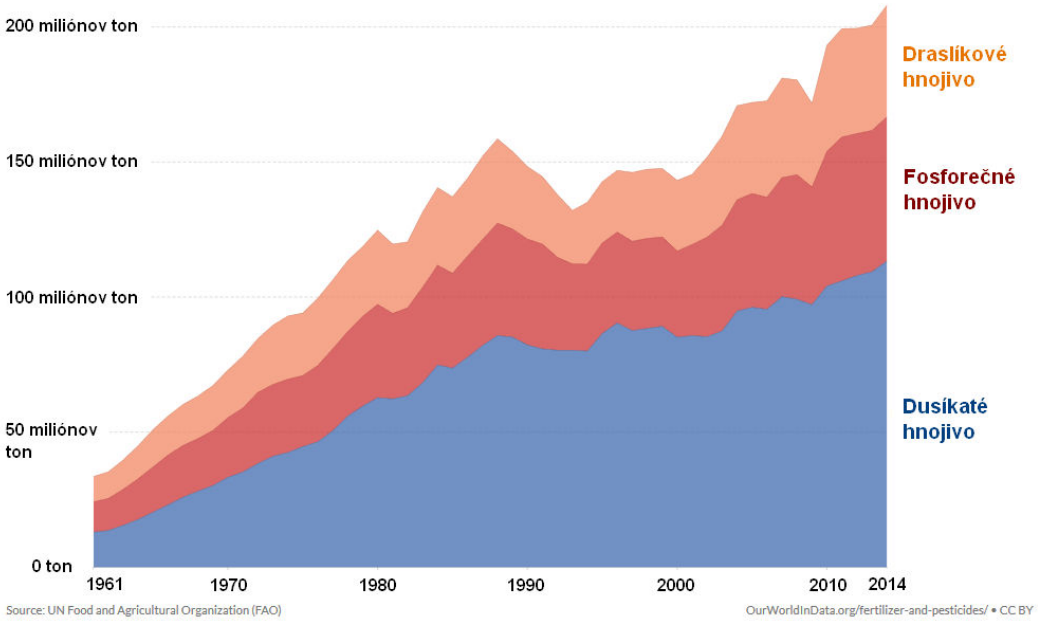
Chemická degradácia pôdy: K najhorším procesom patrí **zasoľovanie** (salinizácia), ktoré spočíva v akumulácii vo vode rozpustných solí v koreňovej zóne pôdy resp. na jej povrchu. Procesy salinizácie prebiehajú najmä v aridných a semiarídnych oblastiach s vysokým výparom v kombinácii s vysokou hladinou mineralizovanej podzemnej vody blízko povrchu a pri intenzívnom zavlažovaní. Problém zhoršuje aj vysoké minerálne hnojenie. Zasoľovanie globálne postihuje až 33 % zavlažovaných pôd (UNEP 2019).

K acidifikácii pôdy (okysľovanie, pokles pH v dôsledku hromadenia katiónov H^+ v pôde) dochádza pri intenzívnom hnojení a v dôsledku kyslých atmosférických depozícií, ktorých prekurzormi sú emisie síry a dusíka transportované na veľké vzdialenosti. V Európe a Severnej Amerike sa po roku 2000 v dôsledku nových technológií acidifikácia výrazne znížila, veľkým problémom je naďalej vo Východnej a Juhovýchodnej Ázii (napr. v Číne postihuje až 21 % rozlohy krajiny).

Kontamináciu pôdy spôsobujú anorganické kontaminanty (ťažké kovy a toxické prvky, napr. arzén a fluór) a perzistentné organické polutanty (v poľnohospodárstve najmä pesticídy a farmaceutické produkty). Kadmium pochádzajúce najmä z minerálnych hnojív sa dnes v EÚ akumuluje v 45 % pôd, najmä v južnej Európe. Pre Európu je dobrou správou zníženie atmosférických depozícií olova (Pb) o 87 % a ortuti (Hg) o 40 %. Na Slovensku bol z hľadiska kontaminácie pôd zaznamenaný pozitívny trend v prípade arzénu a kadmia, nepriaznivý pri kobalte, medi, nikle a zinku (LIESKOVSKÁ & LÉNYIOVÁ 2019; EEA 2020).

Biologická degradácia pôdy: Pôdu priamo ovplyvňuje typ vegetácie, napr. agát koreňovými výlučkami mení chemické zloženie pôdy tak, že je nepriaznivé pre iné dreviny (tento jav sa nazýva alelopatia). Prejavy biologickej degradácie pôdy, najmä úbytok organických látok, ohrozenie edafónu, zníženie biodiverzity a biologickej aktivity v pôde vedie k spomaleniu a obmedzeniu pôdotvorných procesov. Biologická degradácia je často dôsledkom dlhodobých procesov fyzikálnej a chemickej degradácie pôdy.

K biologickej degradácii pôdy vedie aj **intenzívna aplikácia minerálnych hnojív**, ktorá narúša zložité vzťahy rastlín s hubami a baktériami. Základom zdravia a úrodnosti pôdy sú totiž početné a aktívne mikrobiálne a živočíšne spoločenstvá. Kľúčové sú vzťahy rastlín s tými baktériami, ktoré fixujú vzdušný dusík (N) a premieňajú ho do organických zlúčenín (niektoré z nich žijú v symbióze na koreňoch bôbovitých rastlín). Fixácia dusíka baktériami v našich podmienkach môže dosiahnuť až 200 $kg \cdot ha^{-1}$ (paradoxne, pestovanie strukovín na Slovensku sa od 90. rokov 20. storočia rádovo znížilo). Ďalšie baktérie mineralizáciou organických zlúčenín uvoľňujú do pôdy nielen dusík, ale aj fosfor (P) a síru (S).



Obr. 7.2. Rast globálnej produkcie minerálnych hnojív. *Autor:* Our World in Data, Creative Commons BY 4.0. https://ourworldindata.org/grapher/total-fertilizer-production-by-nutrient-tonnes

Deštrukcia týchto rozmanitých vzťahov minerálnym hnojením vedie k dramatickému úbytku baktérii, húb a iných pôdnych organizmov, napr. dážďoviek, čo sa prejaví v zmene štruktúry pôdy (napr. rozpad makroagregátov), úbytku organických látok v pôde, v jej schopností zadržiavať vodu a poskytovať ju rastlinám, viazať živiny, ale aj chrániť rastliny pred patogénmi. (JACOBY et al. 2017; ZÁHORA 2018).

Dezertifikácia: Je najvyšší stupeň fyzikálnej, chemickej a biologickej degradácie pôdy, pri ktorom dochádza k strate jej funkcií, vrátane schopnosti produkovať biomasu, až k premene krajiny na púšť alebo polopúšť. Dezertifikácia je najvyššia v aridných a semiaridných oblastiach, ale v dôsledku zmeny klímy (najmä zvýšeného výparu z pôdy, ak ho nekompenzujú vyššie zrážky) a vyššie načrtnutej degradácii pôdy dnes čelia aridizácii a riziku dezertifikácie aj štáty južnej, strednej a východnej Európy. **Sekundárnou dezertifikáciou** sa nazýva také antropogénne poškodenie pôdy, ktoré znižuje jej úrodnosť, obsah vody a organickej hmoty v pôde, pričom však krajina nemusí mať aridný charakter.

Nepriaznivé vplyvy na vodu a ovzdušie

Vyčerpávanie vodných zdrojov: V globálnom priemere až 70 % čerpaných vodných zdrojov ide na závlahy (UNEP 2019). Medzi štátmi sú však značné rozdiely, na bohatšom Severe viac vody čerpá priemysel, naopak v početných regiónoch Indie a severnej Afriky intenzívne zavlažovanie prudko znižuje zásoby podzemnej vody. Inde veľké odbery povrchovej vody spôsobili, že až 25 % veľkých riek po niekoľko mesiacov v roku nemá dosť vody, aby dotiekli až k moru a sýtili riečne delty (ROCKSTRÖM et al. 2009).

Znečisťovanie vody: Intenzívne minerálne hnojenie, používanie pesticídov a liečiv vedú k znečisťovaniu vôd. Spotreba priemyselných minerálnych hnojív sa oproti 90. rokom 20. storočia síce výrazne znížila (v EÚ klesla na 120 – 150 kg N /ha ročne, v SR je dnes oproti roku 1990 menej ako polovičná), ale napriek tomu súčasná globálna fixácia dusíka pre potreby poľnohospodárstva vo výške 116 – 127 Tg N ročne výrazne presahuje navrhnutý planetárny prah 73 Tg N ročne (STEFFEN et al. 2015). Minerálne hnojivá a pesticídy ohrozujú tiež kvalitu podzemných vôd. Podľa novších výskumov sa na znečisťovaní povrchových vôd výrazne podieľajú aj pesticídy (STEHLE & SCHULZ 2015).

Rastliny všetok minerálny dusík nedokážu využiť, jeho časť sa z pôdy vyplavuje (LIN et al. 2001). Vysoký prísun dusíka a fosforu do stojatých a pomaly tečúcich vôd spôsobuje ich **antropogénnu eutrofizáciu** (od roku 1970 sa prísun týchto živín do riek zvýšil o 15 %, EEA 2020). Táto antropogénna, tzv. kultúrna eutrofizácia za priaznivých klimatických podmienok vedie v týchto vodách k prudkému nárastu fytoplanktónu, najmä mikroskopických rias a siníc, ktoré sú pre viaceré organizmy toxické, tiež vodných makrofytov. Tie za letných slnečných dní akumulujú viac tepla a s rastom teploty vody v nej ubúda kyslík. Po úhyne fytoplanktónu a zooplanktónu sa na dne hromadí detrit, pri ktorého rozklade aeróbne baktérie spotrebujú veľa kyslíka. Jeho nedostatok môže viesť k úhynu rýb a iných organizmov. S eutrofizáciou je spojené aj vyššie zakalenie vody, nepriaznivé najmä pre bentické organizmy.

Znečisťovanie ovzdušia: Pri minerálnom hnojení sa produkuje amoniak (NH_3), pri chove domácich zvierat (najmä hovädzieho dobytka a oviec) a pri pestovaní ryže na bahenných poliach významný skleníkový plyn metán (CH_4), mechanizácia je zdrojom emisií oxidu uhličitého (CO_2), kým hnojenie prispieva k emisiám oxidu dusného (N_2O). Poľnohospodárstvo je predovšetkým najvýznamnejším producentom metánu, na čom sa chov dobytka podieľa 53 %, pestovanie ryže 18 %, hnojenie 11 % a ostatné poľnohospodárske aktivity 18 % (YUSUF et al. 2012).

Nepriaznivé vplyvy na biodiverzitu

Úbytok biodiverzity: Prirodzená biodiverzita sa v poľnohospodárskej krajine Európy zachovala predovšetkým v tradičným spôsobom obhospodarovaných územiach, na Slovensku napr. na Kysuciach, Ostrôžkach, Pieninách, Javorí, Štiavnických vrchoch a inde (ŠPULEROVÁ et al. 2017).

Priemyselné poľnohospodárstvo je odvetvím, ktoré v Európe aj u nás plošne najviac znížilo biodiverzitu. Zodpovedá za rozsiahlu likvidáciu a fragmentáciu biotopov (klčovanie lesov, výruby brehových porastov, vetrolamov, rozorávanie medzí, vysúšanie mokradí), a ich degradáciu (napr. meliorácie lúk,

minerálne hnojenie, eutrofizácia povrchových vôd, v strednej Európe do 90. rokov minulého storočia vysoké zaťaženie pasienkov dobytkom), orientáciu na úzke spektrum komerčných odrôd a plemien a intenzívne používanie minerálnych hnojív a pesticídov.

Obrovské lány polí (neraz veľkosti niekoľko sto ha), strata biotopov v podobe remízok, alejí, medzí a brehových porastov a intenzifikácia poľnohospodárskej produkcie viedli na celom svete k **dramatickému poklesu stavov poľných rastlín, vtákov, obojživelníkov, hmyzu** (vrátane opeľovačov, POTTS et al. 2010), **pavúkov a iných bezstavovcov**.

Priemyselné poľnohospodárstvo dnes zodpovedá za ohrozenie 911 vtáčích druhov (73 % zo všetkých globálne ohrozených vtákov, FAO 2019b). Podľa svetovej organizácie na ochranu vtáctva BIRDLIFE INTERNATIONAL (2013) iba v období 1980 – 2010 sa početnosť populácií vtákov obývajúcich poľnohospodársku krajinu znížila o neuveriteľných 52 %, čo predstavuje úbytok 300 miliónov vtákov.

Obr. 7.3. Päťprstnica obyčajná (*Gymnadenia conopsea*), druh xerotermných strání až mezofilných lúk, patrí k našim voľne rastúcim orchideám, ktoré sú veľmi citlivé práve na minerálne hnojivá a pesticídy. *Foto:* © Peter Sabo.

Nepriaznivé vplyvy pesticídov: Od roku 1950 ich používanie mnohonásobne vzrástlo, pričom dnešné pesticídy sú toxickejšie, globálne sa ich aplikujú 3 milióny ton (v hodnote 40 mld USD, MALTBY 2018). Okrem pozitív ako je najmä znižovanie strát úrod a zvyšovanie zisku farmárov, má ich súčasné intenzívne používanie aj **celý rad negatív** (*upravené podľa*: ISENRING 2010; MILLER & SPOOLMAN 2011):

1) u 550 druhov burín a rastlinných patogénov a u 1 000 druhov hmyzu a hlodavcov sa vyvinula genetická rezistencia voči pesticídom, čo si vyžaduje meniť pesticídy alebo zvyšovať ich dávky;
2) pesticídy vo veľkom zabíjajú aj necieľové organizmy, čím deštruujú prirodzené autoregulačné mechanizmy, napr. rodenticídy vo Veľkej Británii zasahujú 25 – 35 % drobných predátorov z radov cicavcov, moderné organofosfáty zas 42 % opeľovačov, v USA sú pesticídy zodpovedné za nástup 100 nových škodcov;
3) likvidácia burín, hmyzu a iných drobných organizmov pesticídmi súčasne znamená znižovanie potravnej základne pre ich konzumentov – živočíchy na vyšších úrovniach trofických reťazcov;
4) procesmi bioakumulácie a biomagnifikácie sa intoxikácia organizmov (koncentrácia toxickej látky v tkanive) smerom k vyšším trofickým úrovniam znásobuje a zasahuje aj vrcholových predátorov;

Obr. 7.4. Včela medonosná (*Melis apifera*), patrí k druhom, ktoré ohrozujú neonikotinoidy. *Foto:* © Ľudmila Sabová.

5) kontaminácia vodných zdrojov a potravín rezíduami pesticídov ohrozuje aj ľudské zdravie, každoročne sa v rozvo-jových štátoch pesticídmi priotrávia 3 milióny ľudí pracujúcich na poliach a plantážach.

V súčasnosti sa najširšie používanou skupinou moderných pesticídov stali **neonikotinoidy**, pôvodne vyvinuté ako alternatíva k vysoko toxickým organofosfátom a karbamátom. Patria k systemickým pesticídom, ktoré neostávajú iba na povrchu rastliny, ale prenikajú aj do jej pletív. Výskumy preukázali ich dlhodobé pretrvávanie a nepriaznivé účinky na početný užitočný hmyz, najmä na opeľovače, osobitne včely a čmeliaky, na ktoré pôsobia subletálne až letálne (smrteľne, HOPWOOD et al. 2016). Zo systémového hľadiska je tiež dôležité vnímať synergiu vplyvov pesticídov, minerálneho hnojenia, vysokej mechanizácie, aj straty a degradácie zelenej infraštruktúry v poľnohospodárskej krajine.

Nové hrozby: Patria k nim riziká dnes už rozšírených nanomateriálov, geneticky modifikovaných organizmov (GMO), očakávané aplikácie syntetickej biológie (GOOLD et al. 2018) a súčasná klimatická zmena. K problémom GMO patrí najmä kontaminácia tradičných odrôd a riziká ich kríženia sa s voľne žijúcimi organizmami. Zmena klímy mení zrážkový a hydrologický režim v krajine, mikrobiálny život v pôde, posúva vegetačné zóny smerom k pólom a a vegetačné stupne do vyšších polôh, mení a posúva areály druhov a narúša koevolučné medzidruhové väzby. K dôsledkom patrí znižovanie produkcie v tradičných oblastiach, nástup nových inváznych druhov, príchod nových patogénov a hospodárskych škodcov (EEA 2017).

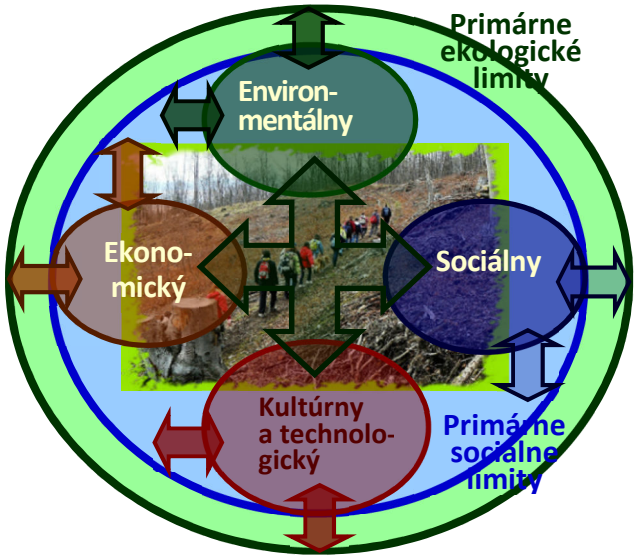
7.1.2 Koncepcia udržateľného sociálno-ekologického systému

Účinné hľadanie cesty k udržateľnej spoločnosti, ktoré reflektuje vyššie načrtnuté argumenty si vyžaduje **systémový prístup k vývoju stratégií a postupov** udržateľného využívania prírodných zdrojov (FIKSEL 2006). Poučením kam vedie absencia systémového prístupu je aj súčasný živelný prístup k podpore obnoviteľných zdrojov energie, predovšetkým v oblasti biopalív, kde sa nielen míňa účinkom, ale výrazne prispieva k ničeniu tropických pralesov a do nemalej miery aj lesov a krovín strednej Európy.

Pri revízii koncepcie UR vychádzame z teórie nerovnovážnej termodynamiky prírodných aj **sociálno-ekologických systémov** (SES, OSTROM 2009; PARTELOW 2018). Energiu transformujúce prvky disipatívnych štruktúr v prírode a v socioekonomickom systéme vzájomne interagujú, čím vytvárajú hierarchicky vyšší autoorganizujúci sa sociálno-ekologický systém (WALTNER-TOEWS & KAY 2005). Tento systém môžeme definovať na miestnej, chorickej (krajinnej), regionálnej alebo globálnej úrovni.

Udržateľný sociálno-ekologický systém (UD-SES)

Integráciu základných subsystémov do hierarchicky vyššieho celku **udržateľného sociálno-ekologického systému** (UD-SES) znázorňuje diagram na obr. 7.1. Jednotlivé vrstvy (piliere) udržateľnosti tu už nevystupujú ako nezávislé, ale sú vnorené do hierarchicky vyššieho celku sociálno-ekologického systému, ktorý definuje ich limity, pričom vyššie vrstvy sú závislé od limitov nižších vrstiev (SABO 2014). Podľa tohto modelu sa už o **primárnych ekologických limitoch** obchodnícky nevyjednáva, pretože ich rešpektovanie



Obr. 7.5. Grafické vyjadrenie koncepcie udržateľnej spoločnosti ako zložitého sociálno-ekologického systému (UD-SES). Existenčnou je najspodnejšia ekologická vrstva (zelený kruh), ktorá nesie všetky ďalšie vrstvy a pre každú z nich definuje ekologické limity. Nad ňou je sociálna vrstva (modrý kruh), ktorá nesie (sú do nej vnorené) subsystémy zodpovedajúce konvenčným pilierom udržateľnosti (UN 2015), doplnené o kultúrno-technologický pilier. Táto vrstva definuje sociálne limity. Ekologické a sociálne limity, ktorými hierarchicky vyšší celok UD-SES obmedzuje menšie subsystémy, sú tu ilustrované ako hranice vonkajších kruhov. *Upravené podľa:* © Peter Sabo, 2014. *Foto:* skautská kvalita života, © Martin Sabo, 2006.

je nevyhnutné pre samotnú existenciu civilizácie. Ak spoločnosť tieto limity nerešpektuje, po ich prekročení dochádza k neudržateľne vysokej entropizácii a tým k degradácii ekosystémov.

Do existenčnej ekologickej vrstvy sa vnára sociálna vrstva, ktorá definuje primárne sociálne limity. V zmysle Maslowovej pyramídy potrieb (ARUMA & HANACHOR 2017) sú nimi najmä zabezpečenie živobytia, bezpečia a zdravia. My k nim priraďujeme i sociálnu spravodlivosť, solidaritu a rešpektovanie dôstojnosti každého človeka, ktoré sú dôležité pre sociálnu integritu spoločnosti. Ďalšie prvky pripomínajú **klasické piliere udržateľnosti**, ktoré interagujú navzájom aj s bázovou ekologickou a sociálnou vrstvou.

Tieto početné interakcie si vyžadujú aj nový prístup k využívaniu krajiny. Jednou z ciest je **integrovaný manažment krajiny**, ktorého základom je integrácia ekologizácie priestorovej organizácie krajiny človekom (na báze krajinnoekologického plánovania), spôsobov využívania jej prírodných zdrojov a ochrany prírody (napr. RUŽIČKA 2000; ŽIGRAI 2001; LEPEŠKA 2009; MIKLÓS et al. 2015; MIKLÓS & DIVIAKOVÁ 2017).

Environmentálny pilier kvality životného prostredia tu nekopíruje existenčnú ekologickú vrstvu, t.j. prírodné a poloprírodné ekosystémy a život udržujúce systémy Zeme, ale vyjadruje jej nadstavbu v podobe inštitucionálnej aj dobrovoľníckej starostlivosti o životné prostredie, ochrany prírody a krajiny. To si totiž už vyžaduje aj vnášanie určitej dodatkovej energie (najmä na účely vedeckého monitoringu a manažmentu ekosystémov). Tento pilier na rozdiel od existenčného ekologického piliera nielen chráni, ale súčasne v rozumnej miere sprístupňuje prírodné zdroje a krajinu ako kľúčové zdroje kvality života človeka (napr. kvalita ovzdušia, vody, úrodnosť pôdy, národné parky).

Podobne **sociálny pilier** nekopíruje pod ním ležiacu sociálnu vrstvu, ale po zabezpečení základných potrieb človeka (živobytie, bezpečnosť a rešpektovanie ľudskej dôstojnosti) zabezpečuje aj ďalšie ľudské potreby vyvierajúce zo synergie dobrej spolupráce ľudí. Do tohto piliera sme zaradili aj dobré spravovanie štátu (*good governance*, ktorý neraz vystupuje aj ako samostatný pilier). K sociálnemu pilieru ďalej patrí najmä zabezpečenie spravodlivosti, zdravotnej starostlivosti, prístupu k vzdelaniu, ale aj solidarity vo vzťahu k menej úspešným, chorým a starým členom spoločnosti.

Ekonomický pilier tu už neznamená nekonečný rast produkcie a spotreby, ale optimálnu úroveň prosperity, ktorá zabezpečuje napĺňanie potrieb človeka bez narúšania primárnych ekologických a sociálnych limitov. Ak totiž ekonomický rozvoj prekročí kapacitu adekvátnu možnostiam nižších „*nosných vrstiev koláča udržateľnosti*“, dochádza k ich degradácii až deštrukcii (KARR 2008). V udržateľnej spoločnosti môžeme z krajiny čerpať prírodné zdroje a emitovať do nej odpady iba do takej miery, do akej miery sa s tým krajina dokáže vysporiadať bez dlhodobého rastu jej entropizácie.

Kultúrny a technologický pilier zahŕňa niekoľko rovín: Etická rovina sa týka dôležitej a potrebnej obnovy pozitívneho vzťahu človeka k mimoľudskému životu a ku krajine, v ktorej žije. Technologická

Možnosti analýzy sociálno-ekologického systému (SES)

Rámec takejto analýzy, ktorá umožňuje porozumieť interakciám prírodných a socioekonomických subsystémov navrhla Elinor Ostrom, ktorá v roku 2009 získala Nobelovu cenu za ekonómiu. Podľa nej stav SES definujú hodnoty riadiacich premenných jeho jadrových subsystémov, ktorými sú:

1) dostupné zdroje, napr. miestne (topické) ekosystémy – lesy, lúky, polia, mokrade,

2) nižšie jednotky týchto zdrojov, napr. stromy, rastliny, poľné plodiny, voda,

3) inštitúcie, ktoré zdroje spravujú, napr. štátna správa, samospráva, miestne združenia,

4) užívatelia týchto zdrojov, napr. urbárnici, športovci a turisti v národnom parku.

Porozumieť správaniu zložitého systému si vyžaduje zmapovať interakcie medzi jeho prvkami, aj medzi subsystémami rôznych hierarchií. Medzi ne patrí napr. využívanie subsystému dostupných zdrojov rôznymi užívateľmi, jeho trhová hodnota a premenné, ktoré ovplyvňujú jeho tzv. ekologickú výkonnosť (napr. úroveň čerpania zdroja pri zachovaní reziliencie a biodiverzity ekosystému), aj premenné hodnotiace tzv. sociálnu výkonnosť spravujúcich inštitúcií (napr. efektívnosť, zúčtovateľnosť).

Zdroj: CAPRA 1997; KAY 2000; OSTROM 2009

rovina predpokladá reguláciu rozvoja technológií, ktoré v súčasnosti už v mnohých smeroch prekročili únosnú ľudskú mieru a začínajú predstavovať existenciálne ohrozenie ľudstva (napr. autonómne zbraňové systémy, vývoj superinteligencie, neregulované aplikácie syntetickej biológie a iné).

Integrita udržateľného sociálno-ekologického systému a jej zmeny

Nevyhnutnosť rešpektovať primárne ekologické a sociálne limity si vyžaduje integráciu ľudských aktivít s prírodou a krajinou, tak aby nenarúšali bázové nosné vrstvy. **Integrita UDSES znamená, že ten ovplyvňuje svoje komponenty tak, aby plnili funkcie celku** a naopak, prostredníctvom riadiacich okruhov záporných spätných väzieb tlmí také ich aktivity, ktoré by integritu a funkcie celku narúšali. Vysoká zložitosť UD-SES znamená, že jeho správanie je predvídateľné iba do určitej miery (KAY 2000), preto je ťažké predvídať dôsledky procesov, ktoré zvyšujú jeho entropizáciu.

Príkladom negatívnych vplyvov na SES systémy je tlak globalizácie, ktorý viedol napr. k prepadu niekdajšej potravinovej bezpečnosti štátov strednej Európy (MIDRIAK et al. 2011). Súvisí s tým aj zarastanie hodnotných lúk a strata ich biodiverzity (BAUR et al. 2006) v dôsledku značného zníženia stavov hovädzieho dobytka a ekonomického tlaku na obmedzenie pastvy ostávajúceho dobytka. V dôsledku úzkeho ekonomického uvažovania, ktoré nevníma ekologické a sociálne súvislosti, sa mnohé miestne subsystémy obhospodarovania kosných lúk silne narušili až rozpadli. Na druhej strane niektorí vedci v tomto trende vidia príležitosť ako zvýšiť podiel území divočiny v krajine (NAVARRO & PEREIRA 2012).

Naopak, ukážkou pozitívnych vplyvov z regionálnej (osobitne európskej) úrovne na miestnu úroveň, ktoré prispievajú k ochrane ekologickej integrity UDSES, sú **agroenvironmentálne programy (AEP)**, ktoré sú už niekoľko desaťročí súčasťou programov rozvoja vidieka členských štátov Európskej únie podporovaných platobným mechanizmom EÚ (WISSMAN 2013). V rámci týchto programov poľnohospodári dostávajú platby za dodržiavanie v týchto programoch predpísaných opatrení vo vzťahu k životnému prostrediu, vrátane ochrany biodiverzity (SEP 2017). V SR sú tieto aktivity súčasťou Programu rozvoja vidieka (súčasný program platí na obdobie 2014 – 2020, MP SR 2020.)

Agroenvironmentálne programy – jedna z ciest udržateľného rozvoja

Rast ľudskej populácie a jej spotreby (predovšetkým mäsa), ako aj nevyhnutnosť odstrániť hlad vo svete si vyžaduje výrazne zvýšiť produkciu potravín a zlepšiť ich distribúciu, a súčasne znížiť rozsah a intenzitu environmentálnych problémov spôsobovaných priemyselným poľnohospodárstvom. To je priam gigantická výzva, ktorá si vyžaduje hľadať nové cesty udržateľnej produkcie, šetrnej k prostrediu a životu.

Udržateľné poľnohospodárstvo: Okrem produkcie potravín musí výrazne šetriť prírodné zdroje a minimalizovať negatívne vplyvy na pôdu, vodu, ovzdušie a biodiverzitu, rešpektovať prirodzené ekologické procesy a zložitosť a integritu ekosystémov a limity ich ekologickej únosnosti. To si vyžaduje predovšetkým znížiť vstupy fosílnych palív, minerálnych hnojív a pesticídov a obnoviť zelenú infraštruktúru poľnohospodárskej krajiny. Poznanie, že pre spoločnosť sú dôležité aj jej mimoprodukčné ekosystémové služby (napr. regulácia miestnej klímy, hydrologického cyklu a pod.), si vyžaduje striktnú ochranu prírodného kapitálu, ako ich generátora. Udržateľné poľnohospodárstvo preto musí byť multifunkčné, okrem produkcie potravín sa jeho cieľom musí stať aj správcovstvo a ochrana ekosystémov a krajiny. Navyše aj poľnohospodárstvo sa nevyhnutne musí adaptovať na výrazne sa meniacu klímu.

Agroenvironmentálne programy v EÚ: Poľnohospodári dostávajú platby z Európskeho poľnohospodárskeho fondu pre rozvoj vidieka za dodržiavanie dohodnutých agroenvironmentálnych opatrení. Ide napr. o podporu environmentálne priaznivej extenzifikácie poľnohospodárskych aktivít, ochranu pôdy pred eróziou, rotáciu plodín, zníženie objemu používaných minerálnych hnojív a pesticídov, manažment pastevných systémov nízkej intenzity, organické poľnohospodárstvo, ochranu významných krajinných prvkov (napr. lesné remízky, živé ploty, brehové porasty, mokrade), historických prvkov a biotopov vysokej prírodnej hodnoty (napr. druhovo pestré lúky) a ich biodiverzity (najmä opeľovače, vtáky hniezdiace v poľnohospodárskej krajine, ohrozené cicavce). V období 2014 – 2020 išlo na agroenvironmentálne platby z uvedeného fondu 25 miliárd EUR.

Agroenvironmentálne programy – jedna z ciest udržateľného rozvoja – pokračovanie

Agroenvironmentálne programy na Slovensku: Stali sa súčasťou programov rozvoja vidieka (PRV). V súčasnosti platí PRV na obdobie 2014 – 2020, jeho 2. strategický cieľ sa venuje udržateľnému manažmentu prírodných zdrojov a adaptácii na zmenu klímy. Zlepšenia stavu poľnohospodárskej krajiny sa tu týkajú najmä opatrenia: č. 10) agroenvironmentálne a klimatické opatrenie, č. 11) ekologické poľnohospodárstvo a č. 12) hospodárenie v územiach Natura 2000.

Agroenvironmentálno-klimatické opatrenie: K prioritám patrí ochrana pôdy (napr. striedanie plodín a prevencia voči erózii, najmä na ornej pôde), eliminácia dopadov a adaptácia pôdohospodárstva na zmenu klímy a zachovanie biodiverzity. V ochrane biodiverzity sa dôraz kladie na ochranu biotopov prírodných a poloprírodných trávnych porastov (vrátane biotopov sysľa pasienkového), chov a udržanie ohrozených plemien zvierat, vytváranie multifunkčných biopásov na ornej pôde, ochranu dropa fúzatého a na integrovanú produkciu v ovocných sadoch, vinohradoch a pri pestovaní zeleniny. Na toto opatrenie bolo v danom období vyčlenených 110 445 miliónov EUR.

Upravené podľa: LACKO-BARTOŠOVÁ et al. 2005; KOZOVÁ et al. 2011; MŽP SR 2013, 2018; SEP 2017; EK 2018; TOMAŠKIN & TOMAŠKINOVÁ 2018; FAO 2019 a,b; LIESKOVSKÁ & LÉNYIOVÁ 2019; UNEP 2019; EEA 2020; MP SR 2020

Závažným problémom súčasnej **Spoločnej poľnohospodárskej politiky EÚ** (CAP, *Common Agricultural Policy*) však je skutočnosť, že takmer štvornásobne vyššie platby ako na agroenvironmentálne programy idú na zvýšenie produkčnej výkonnosti a konkurencieschopnosti fariem, v podstate na podporu ďalšieho spriemyselňovania a intenzifikácie poľnohospodárstva. Do akej miery sú v tomto kontexte agroenvironmentálne programy účinné v ochrane jednotlivých zložiek poľnohospodárskej krajiny závisí od ambícií a nastavenia konkrétnych opatrení jednotlivými členskými štátmi EÚ (SEP 2017).

Niektoré štúdie dokonca došli k záveru, že niektoré AEP nie sú z hľadiska ochrany prostredia účinné a nepomáhajú ochrane biodiverzity. **Riešenia zlepšenia environmentálnej účinnosti AEP** vidia v dvoch smeroch: 1) v prechode od opatrení na báze predpísaných aktivít smerom k opatreniam na báze dosahovaných výsledkov; 2) v zadefinovaní jednoduchých a súčasne robustných indikátorov, pomocou ktorých sa hodnotí environmentálna efektívnosť AEP (BURTON & SCHWARTZ 2013; DUPRAZ & GUYOMARD 2019). Dôležité je tiež precíznejšie členiť agroenvironmentálne schémy na tie, ktorých prioritou je ochrana biodiverzity a tie, ktoré sú zamerané na udržanie ekosystémových služieb, ktoré sú nevyhnutné pre smerovanie k environmentálne udržateľnému poľnohospodárstvu (UNEP 2016).

7.1.3 Revízia koncepcie udržateľnosti na biofyzikálnom základe

Už prvá systematická stratégia udržateľnosti**,** ktorú vypracovali IUCN, UNEP a WWF (1991) pod názvom **Staráme sa o Zem** zdôrazňovala, že pre ľudstvo niet inej voľby, **ako žiť v medziach ekologickej únosnosti Zeme**, keďže doterajší spôsob života „bez hraníc" predstavuje rastúce riziko.

So zreteľom na rozpornosť koncepcie udržateľného rozvoja a jej implementácie (pozri kapitolu 1) sa nám vhodnejšími javia koncepcie udržateľnej spoločnosti (EKINS et al. 1992) a udržateľného vývoja (SABO 2016). **Udržateľná spoločnosť** (US) vychádza z koncepcie udržateľného sociálno-ekologického systému (UDSES), ktorého jednotlivé subsystémy využíva iba do takej miery, **aby nedošlo k ich dlhodobej vysokej entropizácii,** ktorá znamená ich degradáciu, dezintegráciu a úbytok poskytovaných ekosystémových služieb. To si vyžaduje prekonať doterajšiu kvantitatívnu rozvojovú paradigmu neustáleho ekonomického rastu a namiesto nej sa zamerať na zvyšovanie kvality života ľudí.

Napr. načrtnuté agroenvironmentálne programy sú jednoznačne pozitívnym smerom, ale treba si uvedomiť, že takmer štvornásobne väčšia podpora z Európskeho poľnohospodárskeho fondu pre rozvoj vidieka ide dnes na podporu zvýšenia produkčnej výkonnosti a konkurencieschopnosti fariem, čo neraz zahŕňa aj ich ďalšiu **expanziu na úkor životného prostredia a biodiverzity**. Preto potrebujeme hlbšiu zmenu. S ňou súvisí aj **hľadanie modelov udržateľnej ekonomiky**.

V tomto kontexte EKINS et al. (2003) zdôraznili význam prírodného kapitálu, ktorý prispieva k tvorbe bohatstva spoločnosti dvomi cestami: 1) poskytovaním prírodných zdrojov pre produkciu tovarov a služieb a 2) absorbovaním spoločnosťou produkovaných odpadov. Dnes už vieme, že prírodný kapitál je základom širokého spektra ekosystémových služieb, ktoré zabezpečujú existenciu aj prosperitu ľudskej spoločnosti (DE GROOT 2002, 2010).

Biofyzikálna revízia koncepcie udržateľnosti

Toto poznanie je východiskom **biofyzikálnej revízie definície udržateľnosti**. Na koncepciu planetárnych hraníc reaguje predstava udržateľného rozvoja (UR) ako *„rozvoja, ktorý napĺňa potreby súčasnosti, pričom uchováva život udržiavajúci systém Zeme, od ktorého závisí prosperita terajších aj budúcich generácií"* (GRIGGS et al. 2013). Aj táto metafora je však problematická. Rozvoj sa v podnikateľskej sfére totiž chápe najmä ako expanzia (rast firiem, obratu, zisku, rozširovanie trhov). Ako nás však varujú početné vedecké štúdie, dnes už niet kam expandovať, preto i naše „*potreby súčasnosti*" musíme zásadne zrevidovať.

Aj koncepcia zložitosti a nerovnovážnej termodynamiky sa premieta do hľadania cesty k udržateľnej spoločnosti (HOBSON & IBISCH 2010). **Entropizáciu ekosystémov** si všímajú napr. MUYS (2013) aj SABO (2016). Muys kladie dôraz na dôležitú termodynamickú premennú, exergiu, vychádzajúc z poznania, že čím je v ekosystéme viac energie s vysokou exergiou, tým je jeho pufračná schopnosť a reziliencia vyššia (ALLEN & HOLLLING 2010). Udržateľný rozvoj potom definuje ako *„zvyšovanie obsahu exergie v ľudskej spoločnosti a jej exergiovej pufračnej kapacity bez toho, aby to spôsobilo merateľný úbytok obsahu exergie v ekosystéme a jeho exergiovej pufračnej kapacity"* (MUYS 2013).

Problém je, že v praxi sa nedá zabezpečiť, aby ľudské aktivity neviedli ani ku krátkodobému úbytku obsahu kvalitnej energie v ekosystémoch. Biologicky aj ekonomicky totiž **závisíme od konzumácie energie s vysokou exergiou,** ktorá je dostupná v biosfére, hydrosfére aj v litosfére. Podstatné je, aby sme túto vysokokvalitnú energiu nespotrebúvali vyšším tempom, než ako ju dokážu prírodné systémy akumulovať a obnovovať (napr. vo forme produkcie biomasy, povrchovej aj podzemnej vody a pod.). Dnes vidíme, ako synergia vysokého tempa spaľovania fosílnych palív, znečisťovania a rozsiahlej premeny krajinnej pokrývky Zeme viedla k takej vysokej entropizácii Zemského klimatického systému, že dnes čelíme postupujúcej zmene klímy, so závažnými dôsledkami a dramatickými prognózami.

Náš návrh systémovej definície **udržateľného vývoja** spoločnosti je: *„Udržateľný je taký vývoj spoločnosti, ktorý chráni, podporuje a obnovuje život v krajine, v regióne a Zemskom ekosystéme v celej šírke a súčasne zabezpečuje napĺňanie ľudských potrieb potrebných pre dôstojný život, pričom rešpektuje a chráni integritu všetkých sociálne-ekologických systémov, ktorých sa tento vývoj dotýka."*

Podpora života v celej šírke tu znamená, že ľudské aktivity nesmú znižovať zložitosť ani integritu dotknutých sociálno-ekologických systémov, vrátane ich ekologických subsystémov, v krajine kde žijeme alebo ktorej zdroje využívame. Presmerovať spoločnosť na cestu udržateľného vývoja nebude ľahké, keďže prekročenie viacerých planetárnych hraníc Zemského systému si vyžiada **zníženie ekonomických aktivít, *„udržateľný ústup"*** (LOVELOCK 2006) vedúci k zníženiu jeho entropizácie do takej miery, aby bol schopný spontánnej obnovy. Georgescu-Roegen (in KERSCHNER 2010) navrhol koncepciu ekonomickej kontrakcie (*de-growth economy*) spočívajúcu v postupnom a spravodlivom znižovaní produkcie a spotreby s cieľom znížiť záťaž Zeme aj sociálnu asymetriu. DALY (2008) rozpracoval alternatívny model tzv. ustálenej ekonomiky (*steady-state economy*), ktorá nerastie kvantitatívne, ale vyvíja sa kvalitatívne.

Aplikácia koncepcie udržateľného vývoja na príklade organického poľnohospodárstva

Cestou kvalitatívneho vývoja v poľnohospodárstve je smer **organického poľnohospodárstva** (OP, *organic agriculture*), na Slovensku a v Českej republike nazývaného ekologické poľnohospodárstvo. Ide o systém produkcie nutrične kvalitných a ľudské zdravie neohrozujúcich potravín, ktorý významne znižuje a mení vstupy do produkčného procesu, chráni pôdu, vodu, ovzdušie a biodiverzitu; využíva a podporuje prirodzené biologické a ekologické procesy v ekosystémoch poľnohospodárskej krajiny:

*„Organické poľnohospodárstvo je **produkčný systém, ktorý udržiava zdravie pôdy, ekosystémov a ľudí.** Spolieha sa viac na ekologické procesy, biodiverzitu a cykly adaptované k miestnym podmienkam namiesto používania vstupov s negatívnymi environmentálnymi a zdravotnými vplyvmi. Organické poľnohospodárstvo je kombináciou tradície, inovácie a vedy, aby bolo na úžitok spoločnému životnému prostrediu a presadzovalo spravodlivé vzťahy a dobrú kvalitu života pre všetkých zúčastnených."* (IFOAM 2008).

Štyri princípy organického poľnohospodárstva

Zdravie: OP má udržať a posilniť zdravie pôdy, rastlín, zvierat, ľudí aj planéty ako jediné a nedeliteľné.

Ekológia: OP musí vychádzať zo živých ekologických systémov a cyklov, pracovať s nimi, napodobňovať ich a pomáhať ich udržať.

Férovosť (spravodlivosť): OP má byť budované na vzťahoch, ktoré posilňujú férovosť vo vzťahu k životnému prostrediu a k životným príležitostiam.

Starostlivosť: OP má byť manažované opatrne a zodpovedne aby chránilo zdravie terajších aj budúcich generácií a životné prostredie.

Zdroj: IFOAM 2020

Organické poľnohospodárstvo podporuje prirodzené procesy udržania a obnovy úrodnosti pôdy a jej ochrany pred eróziou, vrátane geologického a biologického kolobehu látok a posilnenia pôdnej mikrobiálnej aktivity a schopnosti pôdy zadržiavať vodu. Preto je vylúčené používanie priemyselne vyrábaných minerálnych hnojív, namiesto nich sa používa maštaľný hnoj a iné organické hnojivá. S ochranou pôdy pred degradáciou súvisí aj jej plytšie obrábanie.

Organické poľnohospodárstvo tiež chráni biodiverzitu a usiluje sa o udržanie a posilnenie prirodzených ekologických vzťahov medzi pôdou, pestovanými plodinami a chovanými zvieratami. Okrem minerálneho hnojenia sú vylúčené aj ďalšie agrochemikálie (pesticídy, rastové stimulátory, hormóny, antibiotiká), povolené sú však prírodné pesticídy (napr. pyretrín, síra, niektoré sírany). Na ochranu pôdy a podporu mikrobiálneho života v nej a potláčanie burín aj hospodárskych škodcov sa využíva rotácia plodín, pestovanie polykultúr (viac plodín spolu) a mechanické a biologické potláčanie burín a škodcov (ochrana biotopov ich predátorov). Podobne v chove zvierat sa kladie dôraz aj na ich pohodu a potrebné podmienky.

Dôležité je, že produkcia výstupov z organického poľnohospodárstva je certifikovaná, s čím súvisí kontrola postupov hospodárenia, ktorú vykonávajú akreditované inšpekčné organizácie. Z pohľadu spotrebiteľa nevýhodou OP je, že jeho produkty sú spravidla drahšie ako produkty konvenčného poľnohospodárstva. (Podrobný opis metód ekologického poľnohospodárstva na Slovensku, osevných postupov, obrábania pôdy, výživy, hnojenia a ochrany rastlín mechanickými a biologickými postupmi uvádzajú LACKO-BARTOŠOVÁ et al. 2005; KOVÁČ & MACÁK 2007.)

Môžeme zhrnúť, že organické poľnohospodárstvo 1) produkuje nutrične kvalitné a zdravotne nezávadné potraviny; 2) prirodzenými procesmi udržiava resp. obnovuje úrodnosť pôdy; 3) keďže pôda zadrží viacej vlahy, vyžaduje aj menej vody na závlahy; 3) povrchové a podzemné vody chráni pred znečisťovaním živinami a agrochemikáliami; 4) v dôsledku zníženia mechanizácie znižuje emisie CO_2; 5) chráni biodiverzitu a prispieva k obnove ekologickej integrity poľnohospodárskej krajiny.

Vybrané zo štatistík organického poľnohospodárstva

V roku 2017 sa vo svete organicky hospodárilo v 181 štátoch, celkovo na 69,8 miliónoch ha pôdy, z čoho najväčší podiel mala Austrália (35,6 miliónov ha) Argentína (3,4 milióna ha) a Čína (3 milióny ha); rozloha organicky obhospodarovanej pôdy v Európe bola 14,6 miliónov ha.

Na Slovensku sa v roku 2018 ekologickému poľnohospodárstvu venovalo 802 subjektov, ktoré obhospodarovali 192 143 ha poľnohospodárskej pôdy (9,85 % z jej výmery). Pre porovnanie, v susednej Českej republike to bolo takmer na 14 % a v Rakúsku na viac ako 23 % ich poľnohospodárskej pôdy.

Zdroj: LIESKOVSKÁ & LÉNYIOVÁ 2019; ORGANIC WITHOUT BOUNDARIES 2020

Farmár ako dobrý správca krajiny

Farmár 21. storočia už nemôže byť iba producentom potravín, pretože vzhľadom k obrovskej rozlohe poľnohospodárskej pôdy je dôležité aj to, ako sa stará o jednotlivé zložky životného prostredia – pôdu, vodu, ovzdušie, biodiverzitu, o jednotlivé ekosystémy aj o krajinu samotnú. To si vyžaduje poznať a rešpektovať ekologické vzťahy a procesy v krajine a rozvíjať pozitívny vzťah človeka k prírode.

Na tému nevyhnunosti obnovy tohto vzťahu dnes už existuje rozsiahla literatúra (napr. KOHÁK 1993, 1998; KRCHNÁK 1999; MARTINKOVIČOVÁ 1999; DES JARDINS 2001; KELLER 2010; SABO et al. 2011), tu sa pristavíme iba pri koncepcii **správcovstva prírody a krajiny**. Toto správcovstvo sa opiera o dnes často kritizovaný **antropocentrický** postoj, ktorý povyšuje človeka nad ostatnú prírodu. Domnievame sa však, že najlepšie vystihuje postavenie farmára. Farmár totiž iba ťažko môže vychádzať z romantizujúcich **biocentrických** predstáv (napr. SEED et al. 1993; NAESS 1996), podľa ktorých by človek nemal mať výrazne vyššie práva od iných členov v pradive života. Biocentrizmus je však cenný tým, že zdôraznil **vlastnú hodnotu prírody** (*intrinsic value of nature*), ktorá existuje aj bez ohľadu na to, či prináša úžitky pre človeka.

Obr. 7.6. a) Druhovo pestrá lúka pri Strelníkoch na severnom Podpoľaní, ktorá sa využíva s podporou z agroenvironmentálneho programu. Agroenvironmentálne schémy sa v okolí Strelník aplikujú od roku 2004 a prispievajú k udržaniu pozoruhodnej biodiverzity miestnych travinných porastov. *Foto:* © Dobromil Galvánek, 2014.

b) Chov uhorského stepného dobytka na Kamenínskom slanisku. Pastva sa tu rozbehla s pomocou prostriedkov EÚ v rámci projektu LIFE. Išlo o spoluprácu miestneho poľnohospodára a mimovládnych organizácií BROZ a DAPHNE. Pastva prispieva k obnove a udržiavaniu vzácnych slaniskových biotopov. *Foto:* © Dobromil Galvánek, 2016.

Odhliadnuc od toho, že sa nikdy nemôžeme úplne „vyvliecť“ z našich ľudských postojov, vzhľadom k nepriaznivému stavu našej krajiny a Zeme máme za ne **nezmeniteľnú zodpovednosť**. Farmár 21. storočia by mal zodpovedať nielen za to aby jeho polia, lúky, sad alebo vinohrad priniesli úrodu, ale aj za to, aby prírodný kapitál krajiny nezdevastoval, ale zveľaďoval, aby tento prinášal aj budúcim generáciám úrody a ďalšie mimoprodukčné ekosystémové služby (ktorým sa stručne venujeme nižšie).

Avšak vzhľadom k tomu, že v histórii nebol zriedkavý tzv. „panský antropocentrizmus“, ktorý bol zneužívaný na drancovanie prírodných zdrojov a dokonca na zotročovanie a vykorisťovanie iných rás a národov je k pojmu antropocentrizmus nevyhnutné pridať prívlastok „*pokorný*“ (SOKOLÍČKOVÁ 2012). Až potom sa môže stať tmelom spájajúcim prírodu a ľudskú spoločnosť. Až pokorný antropocentrizmus vedie k **úcte k všetkému životu okolo nás**, ktorý má človek povinnosť chrániť (SCHWEITZER 1993).

Pokorný antropocentrizmus možno vnímať ako *„vyjadrenie vedomej zdržanlivosti a uváženého rešpektu voči celku bytia“* (SOKOLÍČKOVÁ 2012). Autorka tejto koncepcie zdôrazňuje, že tu nejde o vzťah poníženosti, ale úcty k tomu, čo nás presahuje. Pokorný antropocentrizmus vychádza síce z toho, že ľudia sú zdrojom hodnôt, vrátane prisudzovania hodnôt prírode, avšak súčasne má bázeň a rešpekt pred mimoľudskou prírodou a je si vedomý limitov jej antropogénnych zmien. Človeka má viesť k úcte voči všetkému životu a k zodpovednosti, ktorú nie je možné delegovať na rastliny ani živočíchy.

7.2 Ekosystémové služby a ekosystémový prístup

Naša civilizácia závisí od anorganických prírodných zdrojov v zemskej kôre, ale ešte viac od živých prírodných zdrojov, populácií rozmanitých druhov, biotopov a ekosystémov. Nejde však iba o ich priamo spotrebúvané produkty, ale aj o ďalšie ekosystémové služby, ktoré nám jednotlivé ekosystémy a život udržiavajúce systémy poskytujú (EHRLICH & EHRLICH 1992; DAILY et al. 2002).

7.2.1 Ekosystémové služby

Funkcie ekosystémov predstavujú potenciál ekosystémov, ich „ponuku" poskytovať prostredníctvom ich štruktúry a na nej prebiehajúcich fyzikálnych, chemických, biologických a ekologických procesov služby, ktoré umožňujú napĺňať ľudské potreby (JURKO 1990; de GROOT 1992, 2002). Ekosystémové služby (ES) sú ľudskou spoločnosťou využívané konkrétne úžitky z ekosystémov, t.j. tie ich funkcie, ktoré zabezpečujú jej existenciu v pradive života, ako aj ekonomickú prosperitu.

Podobne ako v prípade prírodných zdrojov aj tu môžeme uplatniť antropocentrické hľadisko *sensu stricto*, kedy uvažujeme o využívaní funkcií ekosystémov iba z pohľadu človeka, alebo širšie antropoekocentrické hľadisko, v ktorom si už uvedomujeme etickú aj ekologickú nevyhnutnosť zdieľať funkcie ekosystémov a ich služby s početnými mimoľudskými formami života.

Klasifikácia ekosystémových služieb

DAILY et al. (2002) rozlišujú 14 základných typov ekosystémových služieb. Patrí k nim regulácia chemického zloženia atmosféry, regulácia klímy, vyrovnávanie sa s narušeniami v biosfére, regulácia hydrologického cyklu, vrátane zadržiavania a odtoku vody, udržiavanie zásob podzemnej vody, regulácia erózie pôdy a sedimentácie, tvorba pôdy a udržanie jej úrodnosti, obeh živín, absorpcia odpadov, produkcia biomasy, opeľovanie rastlín, biologická regulácia populácií, udržiavanie biotopov pre rôzne druhy organizmov, produkcia potravín a surovín, poskytovanie genetických zdrojov, vytváranie príležitostí na rekreáciu a na kultúrne a duchovné využívanie krajiny.

Prvým medzinárodne akceptovaným štandardom bola **klasifikácia ekosystémových služieb** podľa Miléniového hodnotenia ekosystémov, ktoré rozlišuje 24 typov týchto služieb členených do štyroch hlavných kategórií (MEA 2005; DEFRA 2007):

1) **zásobovacie, produkčné ekosystémové služby** označujú produkty ekosystémov (napr. plodiny, ovocie, zelenina, ryby a lovná zver, krmivá, voda, palivá, drevo, vlákna, genetické a medicínske zdroje),
2) **podporné ekosystémové služby** sú nevyhnutné pre udržanie života na Zemi (napr. tvorba pôdy, fotosyntéza a primárna produkcia, biogeochemické cykly, udržiavanie biotopov a biodiverzity);
3) **regulačné ekosystémové služby** sú úžitky z regulácie ekologických procesov (napr. regulácia klímy, chemického zloženia atmosféry, vodného cyklu, samočistenie vody, absorpcia a neutralizácia odpadov, ochrana pôdy pred eróziou, ochrana pred záplavami, opeľovanie rastlín),
4) **kultúrne ekosystémové služby** označujú nemateriálne úžitky (napr. estetické, rekreačné, vzdelávacie a poznávacie (napr. priestor pre organizovanie táborov v prírode), duchovné a náboženské).

Podporné ekosystémové služby predstavujú základné ekosystémové procesy, ktoré podporujú ďalšie ES. Klasifikácia ES sa napokon ustálila na tri skupiny ekosystémových služieb (napr. KANIANSKA et al. 2016), v ktorých sa podporné služby spájajú s regulačnými službami (DE GROOT et al. 2010).

V rámci Európskej environmentálnej agentúry bola vytvorená **Spoločná medzinárodná klasifikácia ekosystémových služieb** (CICES – *Common International Classification of Ecosystem Services*), ktorá člení ES už iba do troch kategórií – zásobovacie (produkčné), regulačné a udržiavace, a na kultúrne služby, pričom rozlišuje ich päť hierarchických úrovní (CICES 2018).

Vychádzajúc z klasifikácie CICES bol aj na Slovensku vypracovaný podrobný **katalóg ekosystémových služieb** (MEDERLY et al. 2019), ktorý obsahuje ES najviac relevantné pre územie Slovenska. Venuje

sa aj hodnoteniu súhrnnej kapacity jednotlivých geomorfologických celkov pre poskytovanie jednotlivých skupín ES (produkčných, regulačných a kultúrnych). Ako podklad ku katalógu a pre hodnotenie ES bola vypracovaná aj podrobná ekosystémová mapa Slovenska (ČERNECKÝ et al. 2019).

Niektoré možnosti hodnotenia ekosystémových služieb

Hodnotenie ES je dôležité aj pre porovnávanie kapacity rôznych krajinných celkov poskytovať ES. Základné prístupy k hodnoteniu ES sú biofyzikálne, sociokultúrne, finančné a integrované (ČERNECKÝ et al. 2020). **Biofyzikálne metódy** predstavujú analýzy tokov materiálov, energií, krajinnej pokrývky a patrí k nim aj široko používaný indikátor udržateľného rozvoja, **ekologická stopa**. Táto predstavuje rozlohu biologicky produktívneho priestoru krajiny, ktorý je potrebný pre zabezpečenie všetkých prírodných zdrojov, ktoré daná spoločnosť využíva a pre absorbovanie všetkých jej odpadov (WACKERNAGEL et al. 1999).

Sociokultúrne prístupy analyzujú vnímanie ľudí, skúmajú ich preferencie, potreby a požiadavky na ekosystémy a ich ochotu venovať čas a prostriedky ich ochrane (často ide o chránené územie), ktoré premietajú do nepeňažných vyjadrení hodnoty ES alebo opatrení manažmentu (ČERNECKÝ et al. 2020).

Finančné oceňovanie ekosystémových služieb v environmentálnom účtovníctve spočíva vo vyčíslení celkovej monetárnej hodnoty ekosystémov (*Total Economic Value* – TEV), pričom možno rozlíšiť päť základných zložiek tejto hodnoty (PEARCE & MORAN 1994; PRIMACK et al. 2011):

1) priama úžitková hodnota vyjadruje hodnotu priamo odoberaných produktov ekosystému (napr. dreva, vlákien, lesných plodov, poľných plodín, ovocia, rýb, liečivých rastlín),
2) nepriama úžitková hodnota označuje nepriame ekonomické úžitky – ES ktoré zatiaľ ešte nevstupujú na trh (napr. regulácia klímy, retencia vody, ochrana pôdy, opeľovanie),
3) opčná hodnota vyjadruje úžitky z potenciálnych nových ES, pri inom budúcom využívaní krajiny (napr. hodnota krajiny pre ekoturistiku, nie iba pre šport alebo produkciu),
4) hodnota zachovania vyjadruje nespotrebnú hodnotu biodiverzity, ktorú ocenia až budúce generácie (napr. zachovanie divočiny, ale aj genetických zdrojov v poľnohospodárstve),
5) existenčná hodnota súvisí s poznaním, že od ekosystémov a ich služieb v konečnom dôsledku závisí existencia ľudskej spoločnosti, pričom organizmy a ekosystémy majú aj svoju vlastnú hodnotu.

COSTANZA et al. (1997) hodnotili **17 globálnych ekosystémových služieb** pre 13 typov terestrických a 3 typy morských biómov. Táto prvá globálna štúdia ocenila ročnú hodnotu zatiaľ neocenených (predovšetkým mimoprodukčných) ES na 16 – 54 triliónov USD ročne (priemerne 33 triliónov USD). Neskoršia štúdia (COSTANZA et al. 2014) zvýšila hodnotu všetkých ekosystémami poskytovaných služieb na **125 triliónov USD,** aj napriek tomu, že medzitým došlo k degradácii časti týchto služieb. Kvantifikácia iba šiestich ES (produkcia plodín, produkcia dreva, regulácia klímy, ochrana pred povodňami, opeľovanie, rekreácia v prírode) viedla k hodnote **124,87 miliárd EUR ročne** (EU SCIENCE HUB 2019).

Na Slovensku sa na kvantitatívny odhad hodnoty ekosystémových služieb použil najprv **metodický rámec vytvorený a adaptovaný pre karpatské chránené územia** (BUCUR & STROBEL 2012). Medzi prvými sa tu finančnému oceňovaniu ES venovali Radoslav Považan a Juraj Švajda (POVAŽAN 2013; ŠVAJDA et al. 2013; POVAŽAN et al. 2015). Treba zdôrazniť, že hodnotenie je možné vykonať len pre tú časť služieb, pre ktoré máme k dispozícii dostatočné údaje. Práce realizované rovnakou metodikou (GETZNER 2009; POVAŽAN et al. 2014) odhadujú **ročnú hodnotu ekosystémových služieb v prípade Národného parku (NP) Slovenský raj na 232 mil. EUR a NP Veľká Fatra na 179 mil. EUR.** Analyzovaný bol aj podiel jednotlivých ES na celkovej hodnote v konkrétnych územiach, pričom najmä v prípade chránených území s vysokou návštevnosťou dominujú rekreačné hodnoty. Spomenúť môžeme aj kontingenčné hodnotenie – ochotu platiť s cieľom určiť rekreačnú hodnotu Tatranského národného parku (FÜZYOVÁ et al. 2009) alebo ocenenie rekreačnej funkcie lesov Vysokých Tatier metódou cestovných nákladov (BREZOVSKÁ & HOLÉCY 2009).

Pozitíva finančného oceňovania ES sú v tom, že ich môžeme porovnávať s inými ekonomickými produktami a decízna sféra ich musí brať do úvahy. **Riziká** sú v tom, že niektoré služby nedokážeme

správne oceniť alebo ich účtovná hodnota môže v súťaži s inými produktami ťahať za kratší koniec. Navyše hodnota život udržiavajúcich podporných a regulačných služieb je prakticky nevyčísliteľná.

V súčasnosti najrozšírenejšie **integrované hodnotenie** kombinuje viacero prístupov. Často sa vychádza z tzv. **maticovej metódy**, v ktorej sa jednotlivým ekosystémom priraďuje číselná hodnota z určitej škály, napr. 0 – 5, 0 – 10 alebo 0 – 100, ktorá vyjadruje ich kapacitu poskytovať príslušnú ekosystémovú službu. Takto je možné v matici typy ekosystémov x ekosystémové služby priradiť relatívne hodnoty potenciálu ES a následne s využitím mapovania ekosystémov v systéme GIS kvantifikovať tento potenciál, kapacitu ekosystémových služieb pre jednotlivé typy ekosystémov v reálnej krajine alebo pre jednotlivé krajinné celky (BURKHARD et al. 2009, 2012, 2014). Po zisťovaní dopytu, požiadaviek zo strany spoločnosti je možné analogicky vyhodnotiť reálne toky využívaných ES.

Mapovanie ekosystémových služieb

Hodnotenie ekosystémových služieb je previazané s ich mapovaním v krajine. Ekosystémové služby sú na zemskom povrchu (aj v rámci jednotlivých štátov) **distribuované veľmi nerovnomerne** (CROSSMAN et al. 2013). Mapovaniu ES preto musí predchádzať dobré poznanie a zmapovanie ekosystémov, topografie, krajinnej pokrývky a krajinnej štruktúry územia. Mapovanie ES je dôležité aj preto, aby sme porozumeli tomu ako ekosystémy a ich služby umožňujú existenciu a prosperitu ľudskej populácie (BURKHARD & MAES 2017). Udržateľná totiž môže byť iba taká spoločnosť, ktorá si chráni svoj prírodný kapitál a ktorej požiadavky na ES neprevyšujú ich kapacitu v jej vlastnej krajine.

Pri mapovaní sa hodnotia **potenciálne ES** (zásoby), **dopyt spoločnosti** a **reálne využívané toky ES**, ich mapovanie a hodnotenie intenzívne prebiehalo a prebieha najmä v Európskej únii (MAES et al. 2012; CROSSMAN et al. 2013; BURKHARD & MAES 2017). Cieľom je zmapované ES integrovať do manažmentu ekosystémov a krajiny v rámci ich udržateľného využívania a ochrany prírody (MIKLÓS & DIVIAKOVÁ 2017). Nedostatkom súčasného mapovania je, že neberie do úvahy rezilienciu ekosystémov voči súčasným globálnym environmentálnym zmenám, čo patrí k novým výzvam v tejto oblasti (OLIVER et al. 2015).

Autori **katalógu ekosystémových služieb Slovenska** (MEDERLY, ČERNECKÝ et al. 2019) kapacitu krajiny (geomorfologického celku) poskytovať určité skupiny ES (5 produkčných, 10 regulačných a 3 kultúrne) vyjadrujú v relatívnej stupnici 0 až 100 (ako percentuálny podiel maximálnej kapacity). Autori nadväzujúceho rozsiahlejšieho **hodnotenia ekosystémových služieb na Slovensku** (ČERNECKÝ et al. 2020) vychádzali z modifikovanej pôvodnej matice potenciálov ES (BURKHARD et al. 2014), ktorú rozpracovali na podrobnejšie kategórie biotopov. Následné škálové hodnotenie na báze maticovej metódy im umožnilo aj veľmi precíznu finančnú kvantifikáciu jednotlivých ES pre jednotlivé skupiny ekosystémov a následne ich pre skupiny produkčných, regulačných a kultúrnych ES vyjadriť i pre jednotlivé kraje SR.

7.2.2 Príklad mapovania a hodnotenia zmien ekosystémových služieb

V rokoch 2012 a 2013 sa REPISKÝ (2013) v svojej diplomovej práci (školiteľ Peter Sabo) venoval experimentálnemu mapovaniu a hodnoteniu vybraných ekosystémových služieb a ich zmien v katastri obce Drahovce v Dolnovážskej nive, pričom vychádzal z máp druhotnej krajinnej štruktúry z roku 2013 a z máp historickej krajinnej štruktúry z obdobia II. vojenského mapovania územia, realizovaného v rokoch 1806 – 1869. Ďalším východiskom bola maticová metóda (BURKHARD et al. 2009, 2012), ktorá umožnila priradiť hodnoty potenciálu vybraných ES pre každý typ ekosystému v škále 0 až 5, pričom pôvodná matica bola modifikovaná tak, aby zahŕňala jednotlivé typy ekosystémov v území. Krajinné prvky boli rozčlenené do 52 typov, ktoré tvorili 8 skupín (tabuľka 7.1 a obr. 7.7 a 7.8).

Pre každú z troch skupín ES (nehodnotili sa kultúrne služby) boli vybrané tieto tri typy ES: 1) Z podporných ES to bola biodiverzita, tok vody biotou a využitie slnečnej energie. BURKARD et al. (2009) ich nie práve správne označujú ako ES ekologickej integrity (čím koncept ekologickej integrity redukujú). 2) Zo skupiny ES zásobovacích, produkčných boli vybrané produkcia poľných plodín, hospodárskych

zvierat a produkcia krmiva. 3) Zo skupiny regulačných ES to bola regulácia miestnej klímy, regulácia protipovodňovej ochrany a regulácia doplňania podzemných vôd (REPISKÝ 2013).

Pre jednotlivé typy krajinných prvkov v území bola následne pre súčasnú aj pre historickú krajinu kvantifikovaná ich celková kapacita poskytovať vybrané ES zo skupiny podporných, zásobovacích a regulačných ES ako aj ich kapacitu poskytovať celé súbory týchto ES (REPISKÝ 2013). Takýto prístup umožňuje nielen hodnotiť ES, ale aj skúmať dlhodobý vývoj ES v území. V závislosti od zmien krajinnej pokrývky a štruktúry sa výrazne mení aj schopnosť krajiny poskytovať spoločnosti jednotlivé ES.

Tabuľka 7.1. Výťah z matice odhadu potenciálu, kapacít vybraných ES pre jednotlivé krajinné prvky hodnoteného územia (*upravené a doplnené podľa* BURKHARD et al. 2009, 2012; REPISKÝ 2013). Pre porovnanie sa im priradili aj koeficienty ekologickej významnosti (*upravené podľa* MIKLÓS et al. 1992; REHAČKOVÁ & PAUDITŠOVÁ 2007).

Skupina ES	Ekolog. význam	Podporujúce ES, ekologická integrita			Zásobovacie, produkčné ES			Regulačné ES		
Typ krajinného prvku	KEV	Biodiver-zita	Tok vody biotou	Využitie energie	Poľné plo-diny	Hospodár-ske zvie-	Krmivá	Regulácia mies. klímy	Protipov. ochrana	Doplňanie podz. vôd
Súvislá zástavba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nesúvislá zástavba, vegetácia 15 – 35 %	0,10	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
Rozptýlená zástavba vegetácia 35 – 50 %	0,20	2,00	2,00	2,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
Kultúrna vegetácia obytných súborov, prevažujú travinné porasty	0,20	2,00	2,00	3,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	1,00
Kultúrna vegetácia obytných súborov, prevažujú dreviny, stromy a kry	0,25	2,50	2,50	3,50	0,00	0,00	0,00	1,50	0,00	1,50
Parkové plochy s prevahou drevín	0,30	3,00	3,50	4,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,00
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
Veľkoblokové polia, intenzívne	0,15	2,00	3,00	4,00	5,00	5,00	5,00	2,00	1,00	1,00
Maloblokové polia, skôr extenzívne	0,20	2,50	3,50	4,50	5,00	5,00	5,00	2,00	1,00	1,00
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
Nížinné a podhorské lúky	0,60	5,00	4,00	4,00	0,00	3,00	3,00	2,00	1,00	1,00
Vegetácia protipovodňových hrádzí	0,60	5,00	4,00	4,00	0,00	3,00	3,00	2,00	1,00	1,00
Pustnúce nížinné lúky, dreviny 20 – 45 %	0,70	5,00	4,00	4,00	0,00	3,00	3,00	2,50	1,50	1,50
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
Remízky, prirodzené druhové zloženie	0,60	5,00	4,00	4,00	0,00	0,00	0,00	2,50	1,50	1,50
Vŕbové kroviny na brehoch vôd	0,60	5,00	4,00	4,00	0,00	0,00	0,00	2,50	1,50	1,50
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
Vŕbovo-topoľové lužné lesy porasty	0,80	4,00	5,00	5,00	0,00	0,00	1,00	5,00	3,00	2,00
Dubovo-brestovo-jaseňové lužné lesy	0,80	4,00	5,00	5,00	0,00	0,00	1,00	5,00	3,00	2,00
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
Prirodzené potoky a rieky	0,80	4,00	5,00	4,00	0,00	0,00	0,00	2,00	1,00	2,00
Vodné kanály a zregulov. vodné toky	0,60	3,00	5,00	3,00	0,00	0,00	0,00	2,00	4,00	2,00
Plytké vodné nádrže a mŕtve ramená	0,80	4,00	5,00	4,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	2,00
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
Piesočnato-štrkové lavice bez vegetácie	0,10	1,00	1,50	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	2,00
Piesočnato-štrkové lavice s vegetáciou	0,25	3,00	2,00	2,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	2,00

Výpočet kapacít ES pre typy prvkov krajinnej štruktúry a celok krajiny

Index priemernej kapacity daného typu krajinného prvku vo vzťahu k skupine podporujúcich, zásobovacích a regulačných ES bol počítaný ako aritmetický priemer kapacity jednotlivých ES v danej skupine. Sumárny príspevok príslušnej skupiny krajinných prvkov typu j ku kapacite krajiny poskytovať danú skupinu ekosystémových služieb bol vypočítaný ako vážený priemer takto (REPISKÝ 2013; SABO & REPISKÝ 2013):

$$K_{ES_vybranej\ skupiny\ ES,\ kraj.\ prvkov\ typu\ j} = \sum_{i=1,n} (p_i \,.\, k_{ES_vybranej\ skupiny\ ES,\ kraj.\ prvkov\ typu\ i}) \,/\, P_j,$$

kde $k_{ES_vybranej\ skupiny\ ES,\ kraj.\ prvkov\ typu\ j}$ je koeficient kapacity ekosystémových služieb priradený v matici j-temu typu krajinného prvku, p_i je výmera plochy i-teho prvku zo skupiny j, n je počet prvkov typu j (napr. počet prvkov typu zástavby, alebo typu lúk), P_j je sumárna rozloha všetkých prvkov v skupine j.

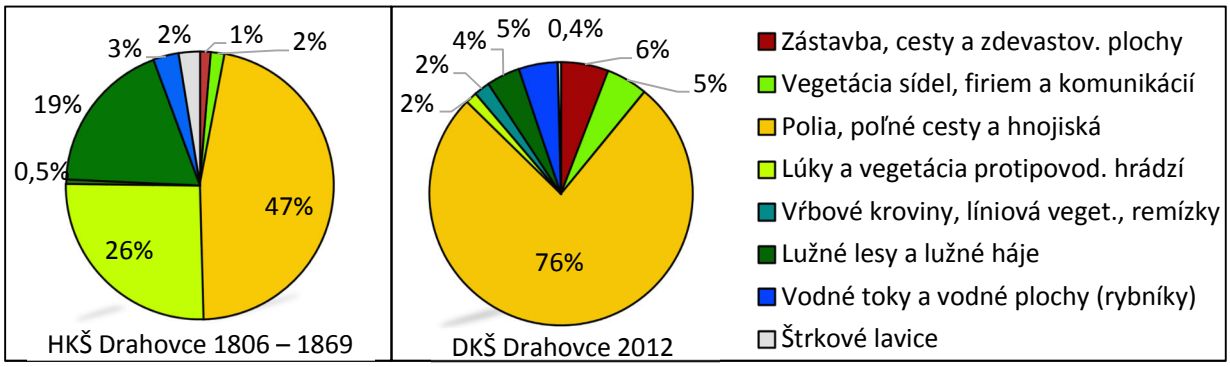
Výpočet kapacity každej skupiny ES pre celú hodnotenú krajinu sme vypočítali ako vážený priemer kapacít jednotlivých skupín krajinných prvkov:

$$K_{ES_vybranej\ skupiny\ ES} = \sum_{j=1,s} (P_j \,.\, K_{ES_\ vybranej\ skupiny\ ES,\ kraj.\ prvkov\ typu\ j}) \,/\, P,$$

kde s je počet skupín príbuzných typov krajinných prvkov v hodnotenom území.

Zmeny jednotlivých skupín prvkov krajinnej štruktúry poskytovať ES

V historickom období bolo na hodnotenom území oveľa menej polí, poľných ciest, hnojísk a ďaleko vyššie bolo zastúpenie lúk, lužných lesov a hájov. K najväčším zmenám krajinnej štruktúry patrí vysoký nárast zastúpenia ornej pôdy aj zástavby, výrazné zníženie zastúpenia lesov a lúk, pozitívne je rozšírenie rybníkov, ktoré vznikli po materiálových jamách na ťažbu štrku pri budovaní diaľnice (obr. 7.7.).



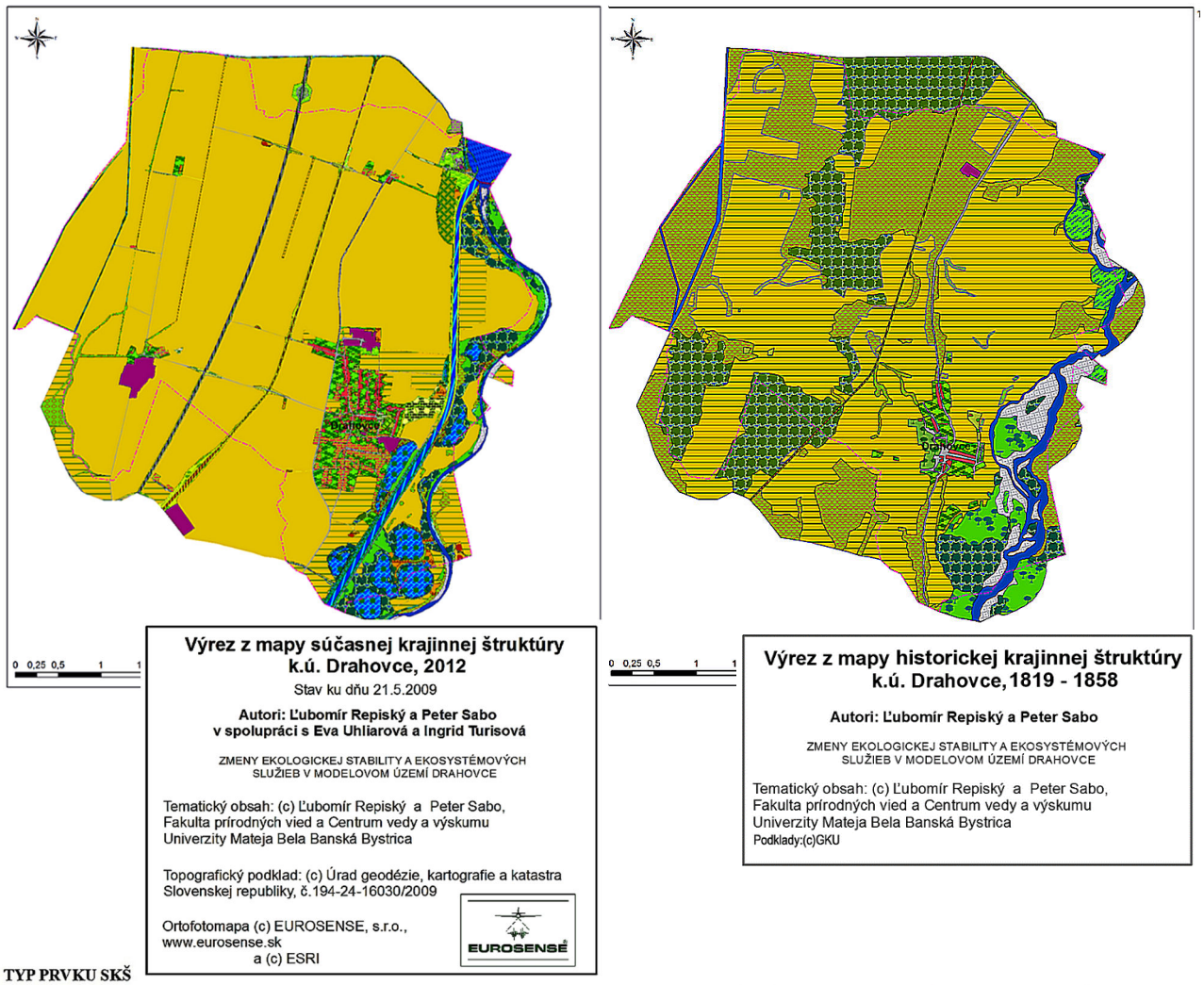
Obr. 7.7. Zmeny percentuálneho zastúpenia jednotlivých typov krajinnej pokrývky v krajine. a) stav podľa historickej krajinnej štruktúry (HKŠ) a b) stav v čase štúdie druhotnej krajinnej štruktúry (SKŠ) hodnoteného územia k.ú. Drahovce v roku 2012. *Upravené podľa:* Repiský 2013.

Z ilustrácií na obr. 7.7 a 7.8 vidieť, že zásadné zmeny sa týkajú najmä skupín: 1) lužných lesov a hájov, 2) medzí, lúk a pasienkov, 3) polí a poľných ciest. U prvých dvoch prišlo k výraznému zníženiu kapacity podporných ES (označených ako ES ekologickej integrity, Burkhard et al. 2009). Paradoxne, v dôsledku vysokého nárastu rozlohy polí sa zvýšila kapacita tejto skupiny prvkov poskytovať ES integrity, čo však nekompenzuje podstatne väčšiu stratu kapacity týchto ES u lesov a lúk.

Zmeny boli vedené snahou zvýšiť produkčnú kapacitu krajiny. To sa podarilo, výrazne vzrástla produkcia obilnín a krmovín, avšak za cenu výrazného zníženia kapacity iných ekologicky významných skupín krajinných prvkov poskytovať mimoprodukčné ES. Predovšetkým to platí pre podporujúce a regulačné ES, ale aj produkčné služby, napr. pokles kapacity produkčných ES lúk (obr. 7.9.).

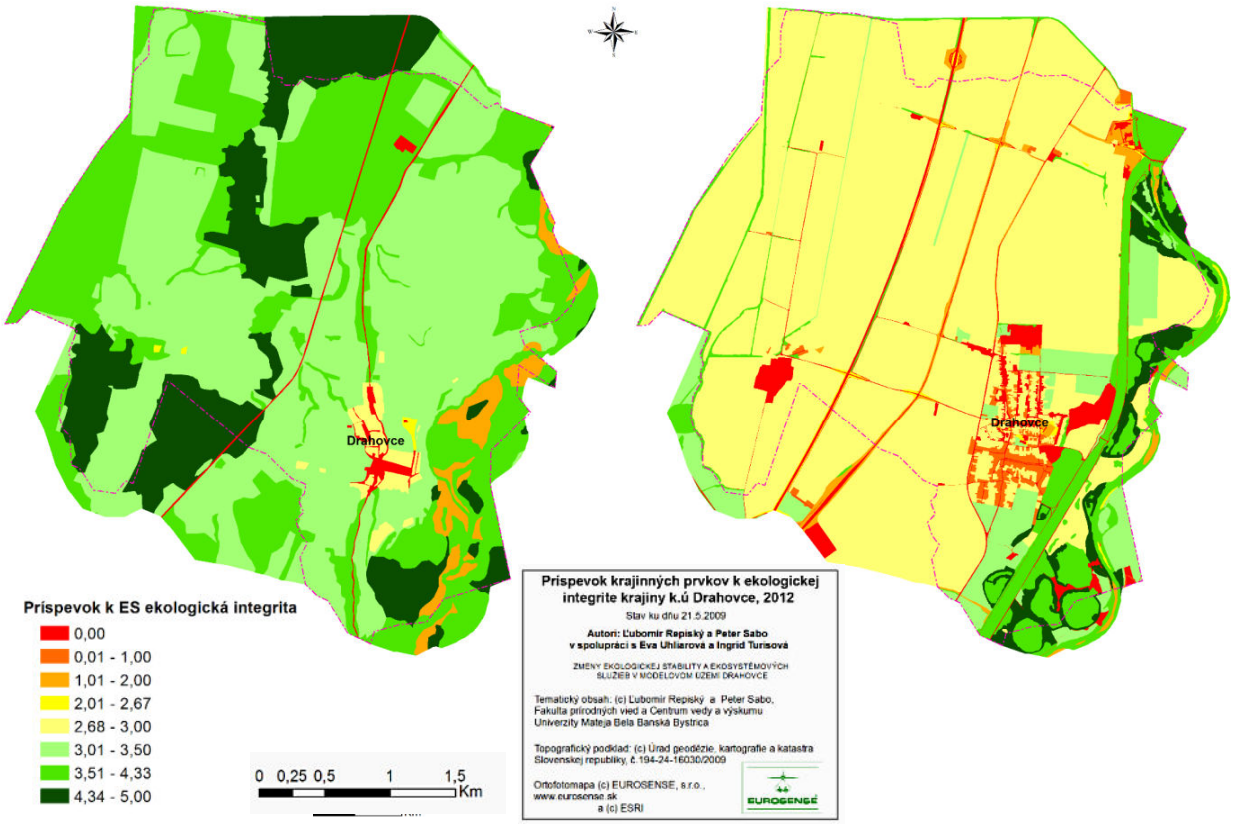
Tabuľka 7.2. Kapacita krajiny Drahoviec poskytovať ekosystémové služby a jej zmeny oproti minulosti. Kapacita hodnotenej krajiny poskytovať jednotlivé skupiny ES bola hodnotená v škále 0 – 5 (Repiský 2013).

Kapacita krajiny Drahoviec poskytovať ekosystémové služby (ES)	Ekologická stabilita	Podporujúce ES (integrity)	Zásobovacie, produkčné ES	Regulačné ES
Historická krajinná štruktúra (HKŠ)	0,43	3,84	2,95	1,67
Súčasná krajinná štruktúra (SKŠ)	0,22	3,01	3,94	1,36
Rozdiel kapacít SKŠ a HKŠ	-0,21	-0,83	0,99	-0,31



Obr. 7.8. Mapy súčasnej a historickej krajinnej štruktúry hodnoteného územia, stav v roku 2009 a v období 1819 – 1858. Juhovýchodná hranica modelového územia (pôvodne hranica katastra obce Drahovce v Dolnovážskej nive) je v mape jemne bioregionálne upravená podľa toku Váhu. *Autori máp:* © Ľubomír Repiský & Peter Sabo, 2013 (REPISKÝ 2013).

Ako vidno z tabuľky 7.2., tieto zmeny krajiny sa prejavili vo vysokom náraste produkčných ekosystémových služieb, ale aj v podobne vysokom úbytku podporujúcich a regulačných ES (SABO & REPISKÝ 2013).



Obr. 7.9. Zmeny sumárnej kapacity prvkov krajinnej štruktúry v území poskytovať vybrané podporné ekosystémové služby (ES integrity). *Autori máp:* © Ľubomír Repiský & Peter Sabo, 2013 (REPISKÝ 2013).

Pri hodnotení zmien krajiny oproti historickej dobe je problematické hodnotenie stavu ekosystémov historickej krajiny, preto tento faktor nebol zohľadnený. Zreflektovaný však bol fakt, že intenzívne využívané veľkoblokové polia majú oproti historickým maloblokovým poliam nižšiu ekologickú zložitosť, aj nižšiu ekologickú integritu (indikovanú napr. nízkym zastúpením poľných druhov flóry i fauny).

K nástrojom riešenia globálnej environmentálnej krízy patrí návrat k **multifunkčnosti využívania služieb ekosystémov a krajiny.** Ekologickým imperatívom každej ľudskej aktivity má byť snaha využívať čo najviac ES súčasne, čo znamená, že cieľom nemá byť iba efektívnosť jednotlivých odvetví, ale efektívnosť využívania ekosystémov ako celkov, čo môžeme označiť ako **ekosystémový prístup**.

7.2.3 Ekosystémový prístup a prizma ekologickej zložitosti pri manažmente ekosystémov

Už prvá Svetová stratégia ochrany prírody (IUCN, UNEP, WWF 1980) nepriamo zahŕňala ochranu prirodzenej ekologickej zložitosti: *„zachovať genetickú diverzitu, udržať základné ekologické procesy a život udržiavajúce systémy a zabezpečiť udržateľné a ekologicky optimálne využívanie druhov a ekosystémov“*. Na ňu nadviazala Svetová stratégia ochrany biodiverzity (WRI, IUCN & UNEP 1992), ktorá definovala biodiverzitu a jej hodnotu, analyzovala príčiny jej úbytku a navrhla spôsoby jej ochrany a udržateľného využívania, zdôrazňujúc posilnenie chránených území aj druhovej ochrany.

Ekosystémový prístup

V roku 2000 bol zmluvnými stranami Dohovoru o biodiverzite prijatý ekosystémový prístup. Ide v pod-

state o **koncepciu integrovaného manažmentu pôdy, vody, ovzdušia a biologických zdrojov ekosystémov na vedeckom základe,** čím sa súčasne posilňuje ich ochrana a umožňuje udržateľné využívanie prírodných zdrojov (SHEPHERD 2004). Ekosystémový prístup sa sústreďuje na vzťahy medzi prvkami resp. celkom ekosystému a človekom, ako aj na tendencie ich vývoja, ktorých poznanie by malo viesť k efektívnemu manažmentu ekosystémov a tým aj k ochrane život udržujúcich systémov Zeme.

Pritom si všíma aj také emergentné vlastnosti, ktoré sú dôležité z hľadiska schopnosti ekosystému odolávať narušeniam (rezistencia) alebo navrátiť sa po odznení narušenia do pôvodného stavu (reziliencia). Ekosystémový prístup teda rešpektuje interakcie medzi organizmami navzájom aj s ich prostredím, ekologické procesy, aj na úrovni ekosystémov sa vynárajúce ich nové emergentné vlastnosti.

Dvanásť princípov ekosystémového prístupu podľa Dohovoru o biodiverzite

1. Ciele manažmentu krajiny, vodných a biotických zdrojov sú otázkou spoločenskej voľby.
2. Starostlivosť o ekosystémy má byť decentralizovaná na čo najnižšiu úroveň.
3. Správcovia ekosystémov majú zvažovať vplyvy ich aktivít na susedné a ďalšie ekosystémy.
4. Starostlivosť o ekosystémy v ekonomickom kontexte znamená redukovať deformácie trhu negatívne ovplyvňujúce biodiverzitu, vytvoriť stimuly pre ochranu a udržateľné využívanie biodiverzity a internalizovať náklady spojené s využívaním a zmenami ekosystémov (preniesť náklady na pôvodcov zmien).
5. Prioritou má byť ochrana štruktúry a fungovania ekosystému s cieľom zachovania ekosystémových služieb.
6. Ekosystémy musia byť riadené (manažované) v rámci ekologických limitov, v ktorých fungujú.
7. Ekosystémový prístup má byť aplikovaný v príslušnom priestorovom a časovom meradle.
8. Vzhľadom na časovú a priestorovú variabilitu procesov, ciele manažmentu musia byť dlhodobé.
9. Pri starostlivosti o ekosystémy musíme vnímať, že zmena je v ekosystéme nevyhnutná.
10. Treba hľadať rovnováhu medzi integráciou ochrany a využívaním biodiverzity.
11. Treba brať do úvahy všetky relevantné informácie, vedecké, etnické a miestne.
12. Tento prístup zahŕňa všetky relevantné sektory spoločnosti a vedecké odbory.

Zdroj: JÖRGENSEN et al. 2007

S ekosystémovým prístupom súvisí systémové myslenie. Pri ochrane biodiverzity už nestačí vnímať a chrániť iba jednotlivé objekty – gény, druhy, spoločenstvá a ekosystémy, ale podstatné je zmapovať tiež ich interakcie a **okrem rozmanitosti štruktúry chrániť aj rozmanitosť prírodných procesov.** Súčasne treba vidieť aj antropogénne procesy, ktoré vedú k úbytku biodiverzity. Napr. fragmentácia biotopov môže mať za následok zmenšenie veľkosti miestnych populácií a s tým spojený úbytok ich genetickej variability, ktorý sa až po čase môže prejaviť v podobe miestneho vyhynutia týchto populácií. Pre úplnosť uvádzame, že fragmentácia niekedy môže viesť aj k zvýšeniu druhovej rozmanitosti, v prípadoch keď okraje nových plôšok osídlia pionierske druhy, v strednej Európe napr. niektoré opeľovače. Prevláda však názor, že celkovo výrazne prevažujú negatívne dôsledky fragmentácie (FLETCHER et al. 2018).

Ekosystémový prístup znamená **integrovaný manažment jednotlivých zložiek** (pôdy, vody, ovzdušia a bioty), ich udržateľné využívanie má zabezpečiť ich potrebnú ochranu a dlhodobo udržať ich funkčnosť a tým aj ekosystémové služby pre spoločnosť (VOLOŠČUK 2001, 2005). Tak prírodné ako aj socioekonomické systémy sú integrálnou súčasťou zložitejších sociálno-ekologických systémov.

Treba povedať, že v praxi sa málokedy podarí aplikovať súčasne všetkých 12 princípov ekosystémového prístupu. Pre praktické použitie ich SHEPHERD (2004) zhutnil **do piatich krokov integrovaného manažmentu ochrany a využívania prírodných zdrojov konkrétnych ekosystémov** (upravené):

1) Vymedziť využívané územie a dotknuté ekosystémy, určiť hlavné zainteresované skupiny (štátna správa, samospráva, podnikatelia, miestne komunity, MVO). Následne **analyzovať vzťahy medzi nimi a ekosystémam**i, vrátane intenzity využívania prírodných zdrojov; ďalej vytvárať a rozvinúť

tieto vzťahy tak, aby všetky zainteresované skupiny mali záujem chrániť dané ekosystémy a podporovať ich udržateľný manažment. K tomuto kroku sú relevantné najmä princípy 1, 7, 11 a 12.

2) Charakterizovať štruktúru, funkcie, ekologickú zložitosť a integritu ekosystémov, k čomu slúži nielen vedecký výskum, ale aj tradičné poznanie miestnych komunít (napr. etnobotanika). Potrebné je **nastaviť mechanizmy udržateľného manažmentu týchto ekosystémov** a využívania ich zdrojov, ako aj monitorovania ich stavu. Dôležitým nástrojom je práve participatívne spravovanie zdrojov s účasťou zainteresovaných strán. Relevantné sú najmä princípy 2, 5, 6 a 10.
3) Identifikovať dôležité ekonomické aktivity, ktoré ovplyvňujú ekosystémy a ich obyvateľov. Následne je potrebné **zredukovať tie trhové deformácie, ktoré majú nepriaznivý vplyv na biodiverzitu** a naopak vytvoriť alebo podporiť stimuly, ktoré umožňujú jej múdre a udržateľné využívanie. Úžitky spojené s využívaním biologických zdrojov a náklady na ich manažment treba internalizovať, aby na tento manažment nedoplácala celá spoločnosť. K tomuto kroku je relevantný najmä princíp 4.
4) Určiť pravdepodobné **vplyvy dotknutých ekosystémov na ďalšie, najmä susedné ekosystémy**, čo je časté najmä v prípade poľnohospodárstva (kedy napr. splachy minerálnych hnojív ohrozujú sladkovodné ekosystémy alebo pesticídy intoxikujú aj potravné reťazce v susedných ekosystémoch). V takom prípade je manažment potrebné upraviť. Relevantné sú najmä princípy 3 a 7.
5) **Stanoviť dlhodobé ciele manažmentu** a flexibilné postupy ako ich dosiahnuť. Flexibilnosť spočíva v adaptívnom manažmente (neustále korigovanom podľa situácie), nakoľko ontická otvorenosť ekosystémov aj sociálno-ekologických systémov znemožňuje detailne predvídať vývoj manažovaných ekosystémov a využívaných prírodných zdrojov. Relevantné princípy sú 5, 8 a 9.

Niektoré známejšie aplikácie ekosystémového prístupu

Z početných aplikácií ekosystémového prístupu v ochrane prírody je významná napr. koncepcia **ekologických sietí** (v zväčša kultúrnej krajine, JONGMAN & PUNGETTI 2004), ktorá okrem ochrany najhodnotnejších, tzv. jadrových území (z ktorých sa druhy môžu šíriť do ďalších území) kladie dôraz aj na ochranu ich prepojení, ekologických koridorov, ktorými sa tieto druhy môžu šíriť.

V strednej Európe je analogickou koncepcia územných systémov ekologickej stability (MIKLÓS 1992; IZAKOVIČOVÁ et al. 1997). Táto sa v 80. a v 90. rokoch 20. storočia rozvinula najmä na území Slovenska a Česka ako súčasť širšej metodiky krajinného plánovania LANDEP (RUŽIČKA 2000; KOZOVÁ et al. 2010, 2011). **Územný systém ekologickej stability (ÚSES)** predstavuje celopriestorová štruktúra navzájom prepojených ekosystémov, ich zložiek a prvkov, ktorá má zabezpečiť rozmanitosť podmienok a foriem života v krajine. Základnými ekostabilizačnými prvkami tohto systému sú **biocentrá, biokoridory a interakčné prvky.** V krajine sa rozlišuje hierarchia ÚSES, od miestneho (napr. na úrovni obce) cez regionálny (na úrovni okresu) až po nadregionálny (celoštátny) ÚSES. (MIKLÓS 1992; BUČEK et al. 1996).

Inou aplikáciou je **participatívny prístup** v ochrane prírody, ktorý sa snaží odľahčiť nepopulárny systém reštrikcií spôsobov využívania pozemkov. Úplné vylúčenie ľudských aktivít totiž často nie je v záujme ochrany prírody (napr. v prípade hodnotných kosných lúk a pasienkov). Participatívny prístup spočíva v tom, že rozmanité v chránenom území zainteresované a dotknuté skupiny (napr. orgány štátnej správy a samosprávy, podnikatelia, vlastníci, nájomcovia a správcovia pozemkov, občianske združenia a iné organizácie a miestni experti) sa aktívne zapájajú do prípravy a posudzovania plánov starostlivosti o chránené územie a následne preberajú aj časť zodpovednosti za realizáciu týchto plánov (BORRINI- EYERABEND & BUCHAND 1997; SABO et al. 2011b).

Pre ochranu prírody mimo chránených území je dôležitým nástrojom **environmentálna certifikácia** hospodárenia, ktoré súvisí s využívaním biologickej produkcie (najmä v lesnom hospodárstve a v poľnohospodárstve) alebo s kultúrnymi ekosystémovými službami (najmä v turizme). Spočíva v **udeľovaní známky kvality** za environmentálne šetrné obhospodarovanie územia podľa určitých pevných, spravidla medzinárodne akceptovaných kritérií a záväzkov.

Napr. **certifikácia v lesnom hospodárstve** znamená systém inšpekcie a označovania lesných produktov certifikátom, ktorý potvrdzuje, že napr. predávaný kus nábytku je z dreva získaného z lesa, v ktorom sa pestovanie lesa a ťažba dreva realizujú environmentálne šetrným, prírode blízkym a tiež sociálne prijateľným spôsobom (FSC 2019). V roku 2018 bolo na základe najvýznamnejšieho lesného certifikačného systému FSC (*Forest Stewardship Council*) certifikovaných 198,862 miliónov hektárov lesa v 83tátoch (FSC 2018). Na Slovensku certifikát FSC získali Lesy SR, odštepné závody v Prešove, Trenčíne a Šaštíne, spolu na rozlohe 126 tisíc ha (LESY SR 2020).

Zhrnutie kľúčových charakteristík ekologických systémov

Model udržateľného sociálno-ekologického systému (UD-SES) zdôrazňuje, že nosná ekologická vrstva definuje limity pre všetky hierarchicky nižšie subsystémy, vrátane socio-ekonomického systému. Ku hlavným systémovým charakteristikám zložitých ekologických (a sociálne-ekologických) systémov patria najmä (*upravené podľa* JØRGENSEN et al. 2007; ALLEN & HOLLING 2010; JØRGENSEN 2012):

1) **vysoká zložitosť a diverzita**, ktorá sa prejavuje vo vysokých počtoch a rozmanitosti prvkov ekosystému, ale tiež ich vzájomných interakcií a z nich odvodených procesov;
2) **otvorenosť ekosystému voči tokom energie, hmoty a informácie,** najznámejšia je tzv. termodynamická otvorenosť, ktorá spočíva vo viac-menej neustálom prísune kvalitnej energie do systému;
3) **autopoietická sieťová organizácia**, v rámci ktorej napr. populácie jednotlivých druhov ovplyvňujú veľkosti populácií iných druhov, alebo jednotlivé ekosystémy ovplyvňujú iné ekosystémy v krajine;
4) **hierarchická resp. holarchická organizácia**, ktorá tlmí prenášanie variability, oscilácií a prírodných (do istej miery aj antropogénnych) narušení prvkov danej hierarchie na vyššiu hierarchickú úroveň;
5) **akumulácia vysoko kvalitnej energie** (s vysokou exergiou) v produkovanej biomase, v organizácii sieťových štruktúr (napr. v trofických sieťach), ako aj v informácii (napr. v rámci druhovej diverzity);
6) **trend vývoja smerom k zvyšovaniu zložitosti organizácie** (v priebehu sukcesie aj evolúcie), v zmysle princípu maximálneho výkonu – s cieľom čo najlepšie využiť dostupnú energiu a ďalšie zdroje;
7) **ireverzibilita** (súvisí s druhým termodynamickým zákonom), **nelinearita**, ktorá súvisí s vysokou zložitosťou a **ontická otvorenosť**, ktorá znamená, že vývoj systému nikdy úplne nekopíruje jeho minulý vývoj;
8) **zložitá dynamika systému** reprezentovaná adaptívnym vývojovým cyklom, ktorý zahŕňa dve dlhodobé fázy rastu a konzervácie a dve krátkodobé fázy uvoľnenia a reorganizácie (vrátane možnej inovácie) systému;
9) **emergentné vlastnosti systému** ako napr. biodiverzita, konektivity jeho prvkov, ale tiež reziliencia, ktorá súvisí s obsahom v systéme uchovávanej energie a podmieňuje ju vysoká dynamika prvkov systému;
10) **ekologická integrita systému** ako vyjadrenie jeho celostnosti (nenarušenia), autenticity (pôvodnosti) a funkčnosti, dobrou metaforou ekologickej integrity je predstava ekologického zdravia systému.

V druhom diele učebnice sa pokúsime priblížiť, čo vyplýva z týchto charakteristík pre manažment rôznych typov ekosystémov. Tu sa obmedzíme iba na ilustráciu niektorých dôsledkov ekologickej zložitosti pre manažment ekosystémov a krajiny v prípade chráneného územia (podľa SABO 2014, upravené).

Niektoré implikácie ekologickej zložitosti pre manažment ekosystémov

Každý ekologický (aj sociálno-ekologický) systém má svoju prirodzenú úroveň zložitosti, pri ktorej je jeho vitalita najvyššia. Udržanie resp. obnova zložitosti štruktúry a správania preto patrí k podmienkam zabezpečenia funkčnosti celku a poskytovania ekosystémových služieb. Ak vychádzame z modelu UD-SES, potom ekologický systém je nosnou vrstvou (obr. 7.1), ktorá definuje primárne ekologické limity pre všetky nižšie subsystémy. Podobne základný sociálny subsystém definuje primárne sociálne limity.

Primárne ekologické limity môžeme odvodiť z koncepcie planetárnych hraníc (STEFFEN et al. 2015a), jej priemetom na regionálnu a miestnu úroveň. Prekročenie planetárnych hraníc (pozri kap. 2) znamená, že v ekosystéme, krajine alebo regióne musíme minimalizovať až zamedziť aj takým aktivitám, ktoré:

1) vedú k dlhodobému zníženiu ekologickej integrity vymedzeného ekologického systému, ako sú napr. rozsiahle lesné holoruby alebo pečatenie pôdy (napr. jej zábermi pre diaľnice a parkoviská);
2) zvyšujú prísun živín, najmä dusíka a fosforu, do vodných ekosystémov (napr. minerálne hnojenie pôdy);
3) posilňujú zmenu klímy cez ďalšie zvyšovanie spotreby energie a tým aj emisií skleníkových plynov alebo narúšajú prirodzené biogeochemické cykly, vrátane cyklu uhlíka (napr. výruby lesov);
4) zvyšujú už v súčasnosti nepriaznivú premenu pôvodnej krajinnej pokrývky a štruktúry, napr. znižovaním podielu lesov v krajine, zvyšovaním podielu ornej pôdy, zástavby a cestnej siete.

Obmedziť treba aj tie aktivity, ktoré prispievajú k napínaniu ďalších planetárnych hraníc, ako je najmä rast spotreby vody, znečisťovanie prostredia, produkcia chemikálií, nanomateriálov a pod.

Primárne sociálne limity môžeme odvodiť napr. zo známej Maslowovej pyramídy základných potrieb človeka (ARUMA & HANACHOR 2017), ktorými sú fyziologické potreby (pre ich naplnenie je potrebné zabezpečiť si živobytie), potreba bezpečia a podľa nás aj rešpektovania ľudskej dôstojnosti. Na ne nadväzujú ďalšie potreby ako sú láska, inklúzia v komunite, rešpekt okolia, možnosti realizácie a ďalšie.

Nižšie ilustrujeme príklad všeobecných implikácií zložitosti UD-SES aj pre manažment environmentálneho, sociálneho, kultúrno-technologického a ekonomického subsystému chráneného územia:

Environmentálny (ekologický) subsystém: vhodné sú opatrenia vedúce k vyššej biotopovej a druhovej diverzite. Vyššia biodiverzita je v podstate poistkou ekosystémov v podobe redundancie druhov v potravných gildách (tzv. portfóliový efekt), pretože zabezpečuje ich funkčnosť aj pri výraznejšom narušení ekosystému a s ním spojenom úbytku druhov. S rastom biodiverzity sa zvyšuje zložitosť a tým obsah kvalitnej energie v ekosystéme a v krajine, ktorá zvyšuje ich kapacitu poskytovať spoločnosti ekosystémové služby, aj ich rezistenciu a reziliencu voči vonkajším vplyvom.

Sociálny subsystém: vhodné je zabezpečiť diferencovaný manažment jednotlivých zón chráneného územia (CHÚ) s účasťou (participáciou) rôznych zainteresovaných skupín (štátna správa, samospráva, združenia, podnikatelia, miestni obyvatelia). Tým sa síce zvyšuje zložitosť riadenia CHÚ a veľkosť na to potrebnej energie, ale súčasne sa zvyšuje aj energia sociálneho subsystému a tým aj jeho potenciál riešiť problémy, ako aj jeho rezistencia a reziliencia voči tlakom zvonku, napr. na zmenu režimu chráneného územia. Všetky zainteresované strany sa súčasne podieľajú aj na prínosoch takto spravovaného chráneného územia.

Kultúrno-technologický subsystém: vhodné je podporiť širšie spektrum nástrojov získavania informácií a poznávania územia, vrátane relevantných tradičných vedomostí o prírode (napr. o liečivých rastlinách v území) a podobne oceniť aj vhodné tradičné postupy hospodárenia. Širšie spektrum informácií aj účastníkov tvorby plánov starostlivosti o územie a ich realizáciu prispieva k vyššej reziliencii celku UD-SES (napr. využitie vhodných tradičných postupov využívania územia, ktoré sa prispôsobujú ekologickým procesom).

Ekonomický subsystém: udržanie primeranej zložitosti UDSES a tým aj ekologického a sociálneho subsystému si vyžaduje aj vhodnú diverzifikáciu ekonomických aktivít v území, ktorá pomáha zvládať výkyvy trhu, zvyšuje reziliencu miestnej ekonomiky. K tejto diverzifikácii môže správa chráneného územia prispieť rozvíjaním širokej spolupráce s rôznymi aktérmi (napr. miestnymi podnikateľmi, lesníkmi, poľnohospodármi, rybármi, turistami).

Príklad manažmentu niektorých lesných ekosystémov

Ekosystémový prístup vychádzajúci z vedeckých štúdií ekológie lesa poskytuje východiská aj pre **pochopenie zložitých procesov v lesných ekosystémoch**, ktorých poznanie je vo vzťahu človek – les kľúčové (FORESTPORTAL 2020). Lesné ekosystémy charakterizuje zložitá fyzická štruktúra a vysoká dynamika, vrátane ich rôzne veľkých cyklických zmien. Identifikácia a porozumenie týmto zmenám sú dôležité pre pochopenie reakcií lesov na v súčasnosti sa meniace ekologické podmienky, čo má význam

pre ich ochranu a manažment (URBAN et al. 2018a, b). Ich ciele je potrebné určovať na základe seriózneho ekologického výskumu (MACHAR et al. 2019).

V posledných rokoch sa v súvislosti so zmenou klímy (a potrebou odlíšiť jej prirodzenú premenlivosť od súčasných výrazných antropogénnych vplyvov a následne zlepšiť plánovanie a odozvy ľudskej spoločnosti) kladie **dôraz na otázky monitoringu klímy, vrátane jej nových prediktorov** – premenných, na základe ktorých je možné predvídať (predikovať) zmeny hodnôt iných premenných (napr. priemerná ročná teplota vzduchu, priemerná mesačná teplota najchladnejšieho a najteplejšieho mesiaca, počet júlových dní s max. dennou teplotou > 32 °C, počet tropických nocí, počet mrazových dní, dĺžka vegetačného obdobia, ročné zrážky, počet dní so snehovou pokrývkou > 3 cm, počet dní s hĺbkou snehu > 10 cm, atď.), vo vzťahu k produktivite lesných drevín i celkových dopadov na lesné ekosystémy (HLÁSNY et al. 2016).

Zmena klímy môže podmieniť tak **zníženie produkcie vplyvom sucha**, predovšetkým v dôsledku zvýšeného výparu (a zníženej dostupnosti vody, ak vyšší výpar nie je kompenzovaný aj vyššími zrážkami) alebo prípadne aj jej zvýšenie vplyvom predĺženia vegetačnej sezóny či rýchlejšieho rozkladu organickej hmoty a následnej vyššej dostupnosti živín. Vplyvom zmeny klímy na lesné ekosystémy je možné v zónach lesnej vegetácie v krajine severnej pologule očakávať **posun produkčného optima** smerom od rovníka na sever a do vyšších nadmorských výšok.

Očakávané dopady zmeny klímy na produkčnú funkciu lesov Slovenska (a tým hospodársky najvýznamnejšiu ekosystémovú službu lesa) sú nepriaznivé, a produkciu zrejme nebude možné udržať na súčasnej úrovni, pretože výmery porastov vo vyšších nadmorských výškach, kam sa presúva produkčné optimum, sú všeobecne menšie, ako výmery porastov vo vegetačných stupňoch, kde sa produkčné optimá drevín nachádzajú v súčasnosti.

Obr. 7.10. Interiér nepôvodného smrekového lesa vo Veporských vrchoch. Vo vyššom a nižšom montánnom stupni (6. a 5. lesný vegetačný stupeň) sa smrek prirodzene vyskytoval len ako drevina primiešaná k buku, prípadne k jedli. Prírodné zmiešané porasty buka a jedle sa vyznačovali vysokou a zložitou dynamikou, pričom dochádzalo k zmenám zastúpenia týchto drevín (pretože každá sa dožíva iného veku a má aj mierne odlišné nároky na prostredie).

Pôvodné bukové lesy boli nahradené smrekovou monokultúrou s nevhodným drevinovým zložením i časovou a priestorovou úpravou. Zmenou druhovej, priestorovej a vekovej štruktúry týchto porastov, ktorá sa výrazne odlišuje od prirodzených lesov, ale aj meniacimi sa ekologickými podmienkami, vrátane zmeny klímy a synergickým pôsobením mnohých činiteľov (hmyz, huby, kopytníky, sneh, vietor, sucho, nesprávne hospodárenie a pod.) došlo k narušeniu ich ekologickej stability. Preto je potrebné premeniť ich na porasty s prirodzeným drevinovým zložením i väčšou vekovou a priestorovou diferenciáciou porastov. *Foto:* © Peter Urban, 2018.

Očakávaný nárast produkcie vo vyšších polohách preto nemôže kompenzovať straty v dôsledku sucha v nižších polohách (HLÁSNY et al. 2013). Očakáva sa, že **frekvencia letného sucha sa bude zvyšovať** so zmenou klímy aj v zalesnených regiónoch Európy, čo sa negatívne prejaví predovšetkým na smreku (JEŽÍK et al. 2015).

Smrekové porasty môžu byť v nižších a stredných polohách **ohrozené vývojom tretej generácie lykožrúta smrekového a narastajúcim stresom suchom**, ktorý zvýši náchylnosť smreka na napadnutie sekundárnymi činiteľmi. Napriek tomu, že z rastových simulácií nevyplynula zvýšená

mortalita smreka, narastajúci tlak biotických činiteľov zrejme neumožní udržanie smrekových porastov starších ako 60 rokov v monokultúrach a mimo horských oblastí (HLÁSNY et al. 2013).

Smrek ako drevina náročná na vodu, zraniteľná biotickými škodlivými činiteľmi a tiež mechanicky, by preto mala byť **nahrádzaná odolnejšími listnatými drevinami,** v nižších vegetačných stupňoch odolnejším dubom zimným a bukom, vo vyšších polohách v prípadnom zmiešaní s jedľou. **Redukcia smrekových monokultúr by mala byť kľúčovým adaptačným opatrením** smerujúcim k zvýšeniu výmer zmiešaných a listnatých lesov (STŘELCOVÁ 2018). Biogeografické modely založené na koncepte vegetačného územného plánovania možno uplatniť nielen v regionálnych scenároch zmien klímy v danej krajine, ale aj ako podporné nástroje na tvorbu stratégií udržateľného obhospodarovania lesov.

Podobne aj **v Českej republike sa podľa regionálneho scenára klimatické podmienky pre pestovanie smreka postupne zhoršujú**. V súčasnosti prevládajú veľmi dobré a dobré klimatické podmienky na jeho pestovanie na približne dvoch tretinách územia krajiny. Na základe výsledkov získaných modelovaním by mali stratégie udržateľného obhospodarovania lesov v Českej republike radikálne zredukovať bežnú prax obhospodarovania smreka iba na regióny jeho súčasného prírodného biogeografického rozsahu v horských oblastiach (MACHAR et al. 2018).

Ekosystémy lužných lesov, najmä tvrdého luhu, situované v alúviách nížinných riek v temperátnej klimatickej zóne v minulosti výrazne ovplyvnili antropogénne aktivity (MACHAR 2012). Štruktúru stredourópskych lužných lesov aj v súčasnosti významne ovplyvňujú lesnícke hospodárske opatrenia, vrátane obnovných postupov, pestovných zásahov a ťažby (OSZLÁNYI 2000).

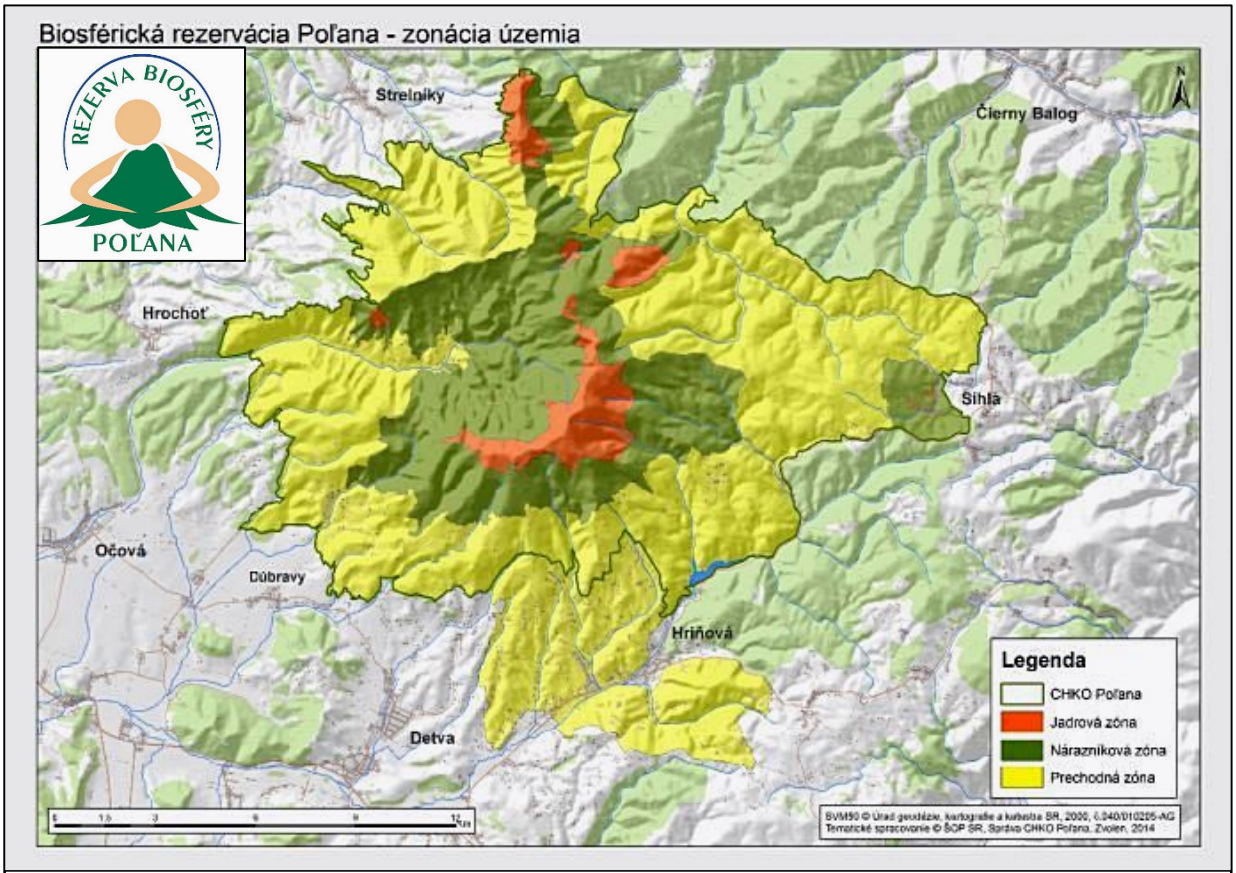
Výsledky štúdie diverzity vtákov v troch rôznych biotopoch lužných lesov v CHKO Litovelské Pomoraví, so špecifickými formami manažmentu (ochrana pralesov, skupinová selektívna ťažba a ochrana okrajov lesov) potvrdili, že heterogenita týchto lesov, podporovaná rôznymi typmi ich manažmentu, poskytuje **pestrú mozaiku biotopov,** ktoré sú vhodné pre mnoho hniezdiacich druhov vtákov s rôznymi ekologickými nikami. Diverzitu vtákov je preto možné použiť ako nástroj na podporu rozhodovania pri uplatňovaní zásad udržateľnosti pri správe krajiny (MACHAR et al. 2019b).

Ďalší výskum v tom istom chránenom území potvrdil, že k významným faktorom, ktorý nepriamo spôsobuje zníženie diverzity a denzity spoločenstva vtákov, patrí aj **vysoká denzita veľkých bylinožravcov** (srnec, jeleň, daniel). Tie nepriaznivo ovplyvňujú najmä vtáčie druhy z tých gíld vtákov, ktoré hniezdia v pásme krovín a na zemi. V chránených územiach, v ktorých je prioritou ochrana biodiverzity, je taký stav dlhodobo neudržateľný. Preto **sa vyžaduje zníženie hustoty populácií kopytníkov,** aby nedochádzalo k likvidácii prirodzenej obnovy lesných drevín a pásma krovín, čo by malo byť spoločným záujmom ochrany prírody aj lesného hospodára (ČERMÁK et al. 2019).

Obr. 7.11. Interiér mäkkého lužného lesa v strednom Poiplí. Pôvodné lužné lesy rastúce na alúviu rieky Ipeľ boli vo veľkej miere zlikvidované ľudskou činnosťou (najmä poľnohospodárskym využívaním pôdy a vodohospodárskymi úpravami) a zachovali sa len ich fragmenty. Na riečnych nivách sa preto roztrúsene nachádzajú rôzne veľké spoločenstvá slatinno-jelšových lesov, vŕbovo-topoľových lužných lesov, dubovo-brestovo-jaseňových lužných lesov a jaseňovo-jelšových lužných lesov. Niektoré z nich majú čiastočne zmenené drevinové zloženie. *Foto:* © Peter Urban, 2010.

Biosférická rezervácia Poľana a participatívny manažment jej ekosystémov

Chránenú krajinnú oblasť Poľana zaradili 27. marca 1990 do sústavy biosférických rezervácií (BR) (chápaných ako rezervy biosféry) v rámci medzivládneho Programu UNESCO Človek a biosféra (*Man and the Biosphere – MAB*). Jej územie bolo rozdelené na tri zóny, ktoré sa vyžadujú pre každú BR. Každá biosférická rezervácia má spĺňať tri základné a vzájomne sa doplňujúce funkcie: ochranársku (zachovanie genetickej, druhovej, ekosystémovej a krajinnej rozmanitosti), rozvojovú (podpora hospodárskeho a ľudského rozvoja, ktorý je spoločensko-kultúrne a ekologicky udržateľný) a podpornú logistickú (podpora názorných ukážkových projektov, environmentálneho vzdelávania a výchovy, výskumu a monitorovania vo vzťahu k miestnym, štátnym, regionálnym a svetovým problémom ochrany a udržateľného rozvoja).



Obr. 7.12. Zonácia územia Biosférickej rezervácie Poľana. Takmer kruhovitý hlavný hrebeň uzatvára kalderu sopky, aktívnej pred 13 miliónmi rokov. *Autor:* Správa Chránenej krajinnej oblasti Poľana, Zvolen.

Poľana, najvyššie sopečné pohorie na Slovensku, tvorené treťohornými vulkanickými vyvrelinami, sa nachádza v jeho strede (1 255 metrová kóta Hrb je geometrickým stredom Slovenska). Jej kaldera, ktorej okraje vytvárajú hlavný hrebeň pohoria, s najvyšším vrchom Zadná Poľana (1 458 m n. m.), patrí k najzachovalejším sopečným kráterom v Európe. Vo vyšších polohách dominuje studená horská klíma, ktorá v nižších polohách prechádza do chladnej a mierne chladnej klímy. Pohorie odvodňuje tok Hučavy, do ktorej stekajú všetky bystriny a potoky vnútri kaldery (dostredivá sieť), kým vodné toky z obvodu kaldery odtekajú na všetky svetové strany (odstredivá sieť). Z pôdnych typov tu dominujú kambizeme, vo vyšších polohách vulkanickej časti BR na ne nadväzujú andozeme.

Zhruba 90 % rozlohy CHKO Poľana pokrývajú lesy. Charakteristickou črtou územia je vegetačná stupňovitosť, podmienená takmer 1 100 metrovým prevýšením územia, aj prelínanie sa panónskych a horských druhov organizmov. V území bolo zaznamenaných 269 druhov lišajníkov, 194 druhov machorastov a vysoký počet cievnatých druhov rastlín, medzi ktorými nájdeme 3 západokarpatské endemity – šafran spišský *Crocus discolor*), skalnicu karpatskú veľkolistú (*Sempervivum carpathicum* subps. *heterophyllum*), peniažtek modrastý tatranský (*Noccaea brachypetala* subsp. *tatrensis)*, ďalej 2 karpatské endemity, 1 druh európskeho významu

Biosférická rezervácia Poľana a participatívny manažment jej ekosystémov – pokračovanie

– zvonček hrubokoreňový (*Campanula serrata*) a 5 druhov národného významu.

Z fauny sa z územia udáva 1 mihuľa, 25 druhov rýb, 11 druhov obojživelníkov, 9 druhov plazov, 186 druhov vtákov a 67 druhov cicavcov. Na Poľane žijú všetky naše veľké šelmy – medveď hnedý (*Ursus arctos*), rys ostrovid (*Lynx lynx*), vlk dravý (*Canis lupus*) a mačka divá (*Felis silvestris*). Z vtákov je na území BR pozoruhodný najmä početný výskyt a hniezdenie strakoša kolesára (*Lanius minor*), škovránka stromového (*Lullula arborea*), muchárika bielokrkého (*Ficedula albicollis*) a ďalších druhov. Bohatá a pestrá je aj fauna bezstavovcov s mnohými vzácnymi a endemickými druhmi.

Obr. 7.13. Interiér smrekového lesa v Národnej prírodnej rezervácii Zadná Poľana. Ide o jedinú vysokohorskú klimaxovú smrečinu na andezitoch na Slovensku, na južnom okraji areálu pôvodných smrečín v Západných Karpatoch. Počas projektu „Ochrana pralesov Slovenska" bol v nej vymapovaný druhý najväčší prales v SR, s rozlohou 855,5 ha. Na území BR Poľana sú najrozšírenejšie bukové a bukovo-jedľové kvetnaté lesy (86 % rozlohy lesov v CHKO). Nasledujú lipovo-javorové sutinové lesy (4,6 %), smrekové (2 %) a ďalšie typy lesov. *Foto:* © Peter Urban, 2017.

Až do roku 2010 bola v tejto biosférickej rezervácii zabezpečovaná prevažne ochranárska funkcia, na úkor rozvojovej a logistickej funkcie. Medzinárodná koordinačná rada Programu MAB v periodickom hodnotení BR Poľana za roky 2000 – 2010 vytkla tomuto územiu nižšie využívanie obyvateľstvom (malý podiel územia s výraznejším vplyvom človeka na prírodu). CHKO (a vtedajšia BR Poľana) totiž predstavuje jedno z najmenej urbanizovaných veľkoplošných chránených území na Slovensku s minimálnym osídlením, nachádzajú sa v nej iba tri osady – Iviny (osada Dúbrav), Snohy a Vrchslatina (osady Hriňovej).

Poľana, rovnako ako ostatné marginalizované územia, navyše čelí problémom spojeným so starnutím miestneho obyvateľstva. Hospodárska a demografická situácia v celom regióne Podpoľania, podmienená zmenou tradičných socioekonomických vzorcov (najmä zanikajúcim tradičným spôsobom života), navyše spôsobila menšie hospodárske využívanie územia, najmä opúšťanie sekundárnych trvalých trávnych porastov (lúk a pasienkov), ktoré sú charakteristickou črtou Poľany a Podpoľania a ich postupné zarastanie. Upustenie od tradičného využívania pasením oviec a dobytka, prípadne zníženie intenzity kosenia sa prejavuje aj znížením biodiverzity pôvodne týchto druhovo bohatších rastlinných spoločenstiev.

Po upozornení zo strany koordinačnej rady, prebehli viaceré inovatívne zmeny v manažmente územia, ktoré mu pomohli zachovať si status biosférickej rezervácie. Rozvinuli sa tiež aktivity, zamerané najmä na zlepšenie komunikácie a spolupráce s verejnosťou. Uskutočnil sa prieskum verejnej mienky, v ktorom vyše 12 tisíc respondentov odpovedalo, že chce, aby územie Poľany bolo naďalej biosférickou rezerváciou. Prebehlo hlasovanie „Sedem divov Poľany", v ktorom zvíťazil vodopád Bystrô, národná prírodná pamiatka. Bola vypracovaná stratégia regionálnej identity a štúdia pridanej hodnoty BR. Taktiež došlo k vytvoreniu Koordinačnej rady Biosférickej rezervácie Poľana, ako poradného orgánu, zriadeného na princípoch partnerstva, ktorý koordinuje všetky aktivity v území BR Poľana tak, aby prispel k miestnemu socio-ekonomickému rozvoju územia, pri súčasnej ochrane jej prírodných hodnôt. Jej členmi sú najmä vlastníci, užívatelia, podnikatelia, obyvatelia, primátori a starostovia, ako aj predstavitelia kultúrnych, vedeckých a mimovládnych organizácií, pôsobiacich v biosférickej rezervácii.

S pomocou Koordinačnej rady BR Poľana sa darí nielen zveľaďovať územie, ale tiež plniť všetky základné funkcie biosférických rezervácií, to znamená ochrannú, logistickú a rozvojovú. Uskutočnil sa prieskum verejnej mienky, v ktorom vyše 12 tisíc respondentov odpovedalo, že chce, aby územie Poľany bolo

Biosférická rezervácia Poľana a participatívny manažment jej ekosystémov – pokračovanie.

naďalej biosférickou rezerváciou a navyše si miestni obyvatelia želajú rozšíriť ju o unikátne historické krajinné štruktúry – hriňovské lazy. Správa CHKO-BR Poľana v roku 2014 prerokovala s mestom Hriňová možnosť rozšírenia prechodnej zóny biosférickej rezervácie o toto vzácne územie – ukážku tradičného obhospodarovania horskej krajiny.

Prechodná zóna BR je totiž určená na rozvojové aktivity, za podmienky, že sú ekologicky a sociálne udržateľné. Z tohto dôvodu sa javilo ako optimálne riešenie pre zachovanie výnimočných historických krajinných štruktúr územia zaradiť ich do prechodnej zóny BR Poľana, čo je zároveň výzvou a príležitosťou pre ich ochranu a zachovanie. Spracovaná nominácia rozšírenia prechodnej zóny BR Poľana bola následne odoslaná do ústredia UNESCO. Návrh na rozšírenie prechodnej zóny BR Poľana, bez navýšenia stupňa ochrany (pretože časť prechodnej zóny je v 2. stupni ochrany), bol schválený na IV. svetovom kongrese o biosférických rezerváciách, nazvanom „Nová vízia pre dekádu 2016 – 2025“, ktorý sa konal 14. – 17. marca 2016 v Lime (Peru).

Obr. 7.14. Južné Podpoľanie, Hriňovsko v oblasti Krivec, rozvojová zóna biosférickej rezervácie Poľana. Hriňovské lazy sú súčasťou špecifickej podpolianskej lazovej oblasti, s jedinečným krajinným svojrázom. Typické sú malé, zväčša terasovite usporiadané políčka v krajine, ktorá nikdy nebola kolektivizovaná. Dnes ide o cennú ukážku tradičného využívania pôdy a historických krajinných štruktúr, ktoré patria medzi najzachovalejšie na Slovensku. *Foto:* © Peter Sabo, 2010.

V Biosférickej rezervácii Poľana sa uplatňuje participatívny prístup k ochrane prírody a krajiny. Za využívanie a manažment ekosystémov zodpovedajú jednotliví užívatelia pozemkov. Správa CHKO BR Poľana usmerňuje ich aktivity v záujme ochrany prírody a krajiny, pričom zohľadňuje aj námety a pripomienky zo strany samospráv, vedeckých aj mimovládnych organizácií. BR Poľana bola ocenená cenou Michela Batissa za najlepší manažment biosférickej rezervácie na svete za rok 2016 s predstavením inovatívneho manažovania „*Biosférická rezervácia – príležitosť pre ľudí a prírodu*“, v ktorom demonštrujeme dôležitosť inkluzívneho prístupu a vzájomnej spolupráce pri riadení medzinárodne významného územia. Takýto prístup môže byť inšpiratívny aj pre iné chránené územia”. V súčasnosti manažment BR Poľana kladie veľký dôraz na rozvoj neformálneho vzdelávania a environmentálnej výchovy detí a mládeže.

Zdroj: VOLOŠČUK 1999; OKÁNIKOVÁ et al. 2014; URBAN 2015a, 2016; URBAN et al. 2015, 2016

7.3 Niektoré východiská a možnosti hodnotenia zložitosti a integrity ekosystémov

Ekologické a sociálno-ekologické systémy sú vysoko zložité, tak z pohľadu ich fyzickej štruktúry ako aj na nej realizovaných procesov. Napriek tomu, že predpovedať správanie zložitých systémov je ťažké, decízna sféra určité prognózovanie potrebuje. Detailné štúdium ekosystémov je časovo náročné, preto je vhodným riešením odhad zložitosti a integrity systému. Monitoring ekologickej integrity ekosystémov a krajín (nielen chránených území) je súčasne vhodným nástrojom pre stanovenie priorít manažmentu využívania prírodných zdrojov alebo chránených území, ale aj pre environmentálnu osvetu a komunikovanie otázok a priorít ochrany prírody pre decíznu sféru a verejnosť.

Kvantifikácia ekologickej zložitosti a integrity si vyžaduje určiť dobre merateľné premenné a dobre kvantifikovateľné a súčasne zrozumiteľné indikátory. Existujúce prístupy k takémuto hodnoteniu sú veľmi rôzne, sú stále predmetom diskusie a dnes patria k najväčším výzvam výskumu a monitoringu ekosystémov a hľadania dobre merateľnej cesty k udržateľnej spoločnosti. Z existujúcich metód (dobrý prehľad podávajú napr. MAES et al. 2011; FABER-LANGENDOEN 2012a,b; BROWN & WILLIAMS 2016; WURTZEBACH & SCHULZ 2016) sme nižšie samozrejme mohli vybrať a priblížiť iba ich malý zlomok. Cieľom tejto podkapitoly je priblížiť vybrané aj pôvodné metódy a možnosti ich využitia.

7.3.1 Východiská hodnotenia ekologickej zložitosti

Ako sme už uviedli, Prigoginovu koncepciu nerovnovážnej termodynamiky a disipatívnych štruktúr (PRIGOGINE 1997) adaptovali pre živé systémy SCHNEIDER & KAY (1994). Organizmy aj ekologické systémy spontánne vytvárajú a udržiavajú svoje usporiadanie v dôsledku prísunu vysokokvalitnej energie. Disipatívne procesy využívajú túto energiu a jej časť vždy transformujú na energiu nižšej kvality. Čím je prísun energie do systému vyšší, tým silnejšia je tendencia k zložitejšiemu usporiadaniu (ULANOWICZ et al. 2006), za podmienky dostatku ďalších zdrojov (v terestrickom ekosystéme najmä vlahy a živín).

Cieľom našich experimentov bolo vybrať a overiť takú metriku ekologickej zložitosti a integrity, ktorá umožní dobre kvantifikovať indikátory ich funkčnej a kompozično-štrukturálnej zložky, ktoré umožňujú odhadnúť stav ekosystému. Históriu vývoja ekosystému (časovú zložku) sme zatiaľ vynechali, pretože jej kvantifikácia si vyžaduje údaje z dlhých časových radov, ktoré vždy nie sú dostupné.

Indikácia štrukturálnej zložky a kompozície ekologickej zložitosti

Štrukturálna zložka ekologickej zložitosti (podobne aj ekologickej integrity) vyjadruje fyzickú štruktúru ekosystému alebo sociálno-ekologického systému, predovšetkým vertikálnu výstavbu vegetácie, ale aj jeho druhovú diverzitu resp. aj diverzitu jeho biotopov (BROWN & WILLIAMS 2016). V našej prípadovej štúdii (v Prílohe) je táto zložka indikovaná **druhovou diverzitou cievnatých rastlín**, pričom okrem štandardného Shannonovho indexu sme v našich experimentoch využili aj ďalšie indexy, s vyššou rozlišovacou schopnosťou (JOST 2006; TUOMISTO 2011).

ADAMI et al. (2000) hodnotia štrukturálnu zložitosť aj podľa veľkosti genetickej informácie obsiahnutej v genóme jednotlivých druhov organizmov, ktoré tvoria živú zložku ekologického systému. Z tohto pohľadu sa táto zložitosť zvyšuje s rastom taxonomickej vzdialenosti (*taxonomic distance*) medzi prvkami ekosystému (DESROCHERS & ANAND 2005). Podľa koncepcie funkčnej diverzity (LEPŠ 2013) je druhová diverzita tým vyššia, čím ide o príbuzensky vzdialenejšie taxóny.

Na druhovú diverzitu nadväzuje kompozícia, druhová skladba a abundancia jednotlivých druhov v spoločenstvách a ekosystémoch, ktorá je v prípade rozlišovania zastúpenia cudzích, inváznych synantropných a pôvodných druhov aj vhodným indikátorom integrity ekosystému. **Ekologicky integrovaný systém** je totiž celistvý, vitálny, funkčný a autentický, má prirodzené druhové zloženie. Túto kompozíciu sme riešili na príklade druhovej skladby vegetácie a hodnotili sme ju podľa pôvodných indexov.

Indikácia funkčnej zložky ekologickej zložitosti

Biologická a ekologická zložitosť sa neobmedzuje iba na fyzickú štruktúru ekologického (alebo sociálne-ekologického) systému, ale zahŕňa aj zložitosť v nej prebiehajúcich procesov, ktorých synergickým výsledkom je aj zložitosť správania sa daného systému, vrátane zložitosti jeho funkcií.

Podľa termodynamickej teórie sa zložitosť organizácie zvyšuje s rastúcim prísunom energie, preto schopnosť zachytenia a disipácie tejto energie patrí k dobrým indikátorom miery usporiadanosti systému. Vyjadruje jeho schopnosť účinne zachytiť slnečnú energiu, efektívne ju využiť na rozvoj vnútornej organizácie systému, v jeho fyzickej štruktúre ju aj uchovávať a súčasne ju v zmysle druhého

termodynamického zákona disipovať (KAY 2000, 2001; KAY et al. 2001; JØRGENSEN et al. 2007). Preto ju označujeme ako **funkčná (behaviorálna) zložka ekologickej zložitosti**.

Účinnosť disipácie slnečnej energie ekosystémom (podiel disipovanej energie voči celkovej prijatej energii) sa premieta aj do jeho povrchovej teploty: čím vyššia je táto disipácia, tým chladnejší bude povrch (POKORNÝ 2001, 2009, obr. 6.5 v kapitole 6). K významným proxy indikátorom disipácie slnečnej energie preto patria aj indikátory teploty povrchu vegetačného krytu a jej zmien.

Rastliny suchozemských ekosystémov mierneho pásma sú v horúcich slnečných dňoch vystavené tepelnému stresu a bez účinného mechanizmu ochladzovania ich povrchu by čelili hrozbe prehriatia a zvýšenia teploty ich povrchu až na 45 °C, čo je pre väčšinu rastlín tohto pásma letálne (CAIN et al. 2014). Preto sú nútené regulovať energetickú bilanciu systému atmosféra – rastlina prostredníctvom rôznorodých adaptácií. Napr. bielo plstnatý pokryv listov zvyšuje ich albedo a tým znižuje príjem slnečného žiarenia. Najdôležitejším ochladzujúcim mechanizmom v krajine je však **transpirácia**, výdaj vody povrchom rastlín (BROM & POKORNÝ 2009; EISELTOVÁ et al. 2012). Súhrnný výpar vody v krajine procesmi evaporácie a transpirácie sa nazýva **evapotranspirácia.**

Indikácia hodnotenia ekologickej integrity

Ako už vieme, ekologická integrita vyjadruje mieru schopnosti živého systému fungovať spontánne na báze pôvodných autoorganizačných a autoregulačných mechanizmov, pri udržaní pôvodnej fyzickej štruktúry a kompozície (pôvodnej druhovej skladby), aj funkčných charakteristík a autenticity správania systému. Súčasne je aj mierou konektivity, koherencie systému. Ako sme už načrtli v kapitole 6, **ekologicky integrovaný systém** je celistvý a neporušený, vitálny a funkčný, autentický a prirodzený. Charakterizuje ho taká vnútorná organizácia, v ktorej je vitalita systému, jeho funkčnosť (a tým aj poskytovanie ekosystémových služieb) a jeho reziliencia voči zmenám vonkajšieho prostredia najvyššia.

Koncepčný model pre hodnotenie ekologickej integrity spočíva v hľadaní kritérií a navrhovaní indikátorov EI (BROWN & WILLIAMS 2016). Tieto kritériá a indikátory sú na každej úrovni hierarchie iné. Napr. v prípade ekosystému hovoríme o druhovej skladbe, kým v prípade krajiny o skladbe krajinnej mozaiky, ktorú definujú interagujúce a v krajine sa opakujúce ekosystémy.

KAY (1993) považuje za tri prejavy integrity ekosystému

1) schopnosť fungovať za normálnych environmentálnych podmienok,

2) schopnosť vyrovnávať sa so zmenami týchto podmienok, čo vyvoláva environmentálny stres,

3) schopnosť rozvíjať resp. vyvíjať sa prostredníctvom neustálych autoorganizačných procesov.

Ekologickú integritu spoločenstva a ekosystému môžeme hodnotiť viacerými spôsobmi, zväčša **porovnávaním atribútov hodnoteného a referenčného ekosystému**. Ako sme totiž už načrtli v predošlej kapitole, mierou ekologickej integrity je „ekologická vzdialenosť" hodnoteného systému k referenčnému prírodnému vzoru, ktorá sa týka výstavby fyzickej štruktúry, kompozície (napr. druhovej skladby resp. skladby krajinných prvkov), funkčnosti (medzidruhových interakcií resp. tokov energie, látky a informácie cez hranice susedných ekosystémov). K referenčným normatívom patria najmä charakteristiky pôvodných prírodných ekosystémov a krajín, divočiny (NAVARETTE et al. 2004), ktoré je na Slovensku možné získať z opisov potenciálnej prirodzenej vegetácie v krajine (MICHALKO et al. 1986).

Predpokladom hodnotenia integrity ekosystémov je vhodný **monitoring** ekologických podmienok a biodiverzity ekosystémov (URBAN 2015b). V prípade biodiverzity ide o monitorovací program, ktorý sleduje populačnú dynamiku cieľových a ohrozených druhov, analyzuje ich významné interakcie, kvantifikuje primárnu produkciu alebo sa zameriava na iné vlastnosti ekosystému (najmä na jeho druhovú diverzitu a druhovú skladbu). Takto môžeme hodnotiť trendy zmien v zásobách prírodných zdrojov, v kapacite ekosystémov poskytovať ekosystémové služby a identifikovať procesy ohrozujúce biodiverzitu. Napr. Lesná služba USA (*US Forest Service*) využíva koncepciu ekologickej integrity pri krajinnoekologickom plánovaní a monitorovaní lesných ekosystémov. (WURTZEBACH & SCHULTZ 2016).

Z histórie hodnotenia integrity na báze multimetrických indexov

Medzi prístupmi prevažujú tzv. multimetrické indexy, pri ktorých sa hodnotí viac premenných, ktorých hodnoty spolu dávajú určitý obraz o stave ekosystému. Menej rozšírené sú celostné indexy, ktoré hodnotia stav, zložitosť alebo integritu ekosystému alebo krajiny.

Napr. hodnotenie sladkovodných ekosystémov rozpracoval James Karr (*1948). Ním vytvorený **index biologickej integrity (IBI)** spočíva v zisťovaní výskytu indikačných druhov a ich synúzií. Biologickú integritu definuje ako schopnosť *„podporovať a udržiavať rovnovážne, integrované a adaptívne spoločenstvá organizmov..."* s plným rozsahom tých prvkov a procesov, ktoré sa vyskytujú v prírodnom biotope daných druhov v ich prirodzenom areáli (KARR 1991, 1998).

IBI index sa kvantifikuje podľa kritérií biologických zmien v sladkovodných ekosystémoch. Porovnávacími štandardami sú opäť prírodné ekosystémy, divočina. Zmeny sa vyhodnocujú ako zmeny druhového zloženia spoločenstiev rýb, vybraných bezstavovcov a rias, vrátane zmien druhového bohatstva, výskytu indikačných druhov a relatívnej hojnosti druhov v rámci vybraných ekologických gíld (PRIMACK et al. 2011). Tieto kritériá Karr považuje za významnejšie ako kritériá chemických zmien v ekosystémoch. Podobne BUNN & DAVIES (2000) používajú na hodnotenie ekologickej integrity tečúcich vôd biologické kritériá. Tieto prístupy sú však ťažšie uplatniteľné v prípade terestrických ekosystémov, ktoré sú zväčša zložitejšie ako sladkovodné ekosystémy.

Kritériá pre **návrh indexu pre hodnotenie ekologickej integrity mokradí** a pre návrh opatrení ich manažmentu navrhli FABER-LANGENDOEN et al. (2006, 2012a, 2012b). Ich index však reflektuje nielen biologické, ale aj abiotické vlastnosti ekosystémov a tiež kontext krajiny, šírku pufračnej zóny okolo mokrade, využitie priľahlého územia, podiel nefragmentovanej krajiny, vzdialenosť k najbližšej ceste.

ANDREASEN et al. (2001) navrhli kritériá pre vytvorenie agregovaného **terestrického indexu ekologickej integrity** (TIEI), ktorý má reflektovať kompozíciu ekosystému (cieľové, indikačné a kľúčové druhy), fyzickú štruktúru a funkcie ekosystému alebo väčšieho krajinného prvku. Autori sa v tomto indexe snažia postihnúť aj priestorové charakteristiky krajinnej štruktúry, napr. zastúpenie jednotlivých typov biotopu, priemernú veľkosť plôšok, priemernú vzdialenosť medzi nimi, konektivitu a iné.

TIERNEY et al. (2009) navrhli protokol pre hodnotenie ekologickej **integrity lesov mierneho pásma** na severovýchode USA, ktorý berie do úvahy údaje ich dlhodobého monitoringu. Vychádzajú z 13 indikátorov, ktoré zahŕňajú hodnotenie fyzickej štruktúry lesného ekosystému (veľkosť, štruktúra porastu, spôsob využívania, podiel mŕtveho dreva v lese) a kompozície (indikačné, kľúčové a inváz ne druhy, ale tiež zdravotný stav stromov), a funkčnosti lesov (rast a mortalita stromov, chemizmus pôdy – najmä jej acidifikácia a nasýtenie dusíkom) prostredníctvom trvalých monitorovacích plôch.

Pri manažmente národných parkov Kanady sa ekologická integrita hodnotí podľa odhadov **ekologického stavu vybraných ekosystémov**, ako sú lesy, trávne porasty, sladkovodné ekosystémy a mokrade, ktoré sa označujú ako indikátory (poznámka: použitie pojmu indikátor v tejto koncepcii je trochu iné ako je zaužívané v literatúre). Odhad stavov týchto „indikátorov" sa zameriava na zhodnotenie ich vybraných ekologických vlastností. Tento stav sa následne komunikuje smerom k rozhodovacej sfére, verejnosti a ďalším v hodnotenom území zainteresovaným stranám (WOODLEY 2010).

Celostné indexy ekologickej integrity

Odhad ekologickej integrity na báze celostných charakteristík ekosystémov ako sú ich vitalita, organizácia a reziliencia prezentuje ULANOWICZ (1995, ex in WESTRA et al. 1999). Navrhuje merať produkciu entropie, ktorá vzniká disipáciou energie slnečného žiarenia, a to porovnávaním spektra toku žiarenia smerujúceho na povrch ekosystému a spektra žiarenia emitovaného povrchom. Ekosystémy bližšie prírodnému optimu totiž emitujú žiarenie vyššej entropie, ich povrchová teplota je nižšia. Hodnotenie integrity ekosystémov na báze nerovnovážnej termodynamiky, analogické hodnoteniu funkčnej zložky ekologickej komplexity, rozvíjal predovšetkým James KAY (2000, 2001, 2002).

ULANOWICZ (2004) a ULANOWICZ et al. (2006) navrhli koncepciu tzv. **ascendencie** ako funkcie energetických tokov v trofickej sieti ekosystému. Teória ascendencie vychádza z informačnej teórie a jej výpočet si vyžaduje podrobnú energetickú analýzu potravnej siete z hľadiska rozmanitosti tokov energie, celkovej energetickej priepustnosti, priemerného počtu trofických úrovní a pod. Výsledkom je index celkovej výkonnosti ekosystému, tzv. **index ascendencie systému** (*system ascendancy*). Keďže platí, čím vyšší tok energie cez systém, t.j. čím vyšší prísun energie do systému, tým bude aj vyššia organizácia systému. To znamená, že ascendencia je dobrým celostným indikátorom úrovne organizácie ekosystému a tým aj jeho celkovej kvality aj reziliencie voči narušeniam zvonku (napr. PATRICIO et al. 2006). V priebehu sukcesného vývoja ekosystému jeho energetická priepustnosť, celková funkčnosť a teda aj ascendencia stúpa. Výpočet ascendencie ekosystému je však pomerne prácny, a preto je pre zložité terestrické ekosystémy menej vhodný ako pre hodnotenie sladkovodných ekosystémov, pre ktoré bol vyvinutý.

Prvé hodnotenie ekosystémov na báze termodynamickej teórie realizovali LUVALL & HOLBO (1989), ktorí preukázali, že čím je zložitejšia vnútorná organizácia ekosystému, tým je jeho povrchová teplota nižšia. LIN et al. (2009) hodnotili úroveň autoorganizácie piatich rastlinných spoločenstiev v juhozápadnej Číne. Najbližšie prírode bol sezónny tropický dažďový prales, nasledoval umelý tropický dažďový prales, kaučuková plantáž, ďalej 13-ročný krovinový porast s dominanciou *Chromolaena odorata* resp. 1-ročný porast s touto rastlinou. Preukázali koreláciu medzi zložitosťou vegetácie a úrovňou disipácie slnečnej energie ekosystémami a vplyv zmien využívania krajiny na lokálnu teplotu ovzdušia. Najvyššiu úroveň autoorganizácie mal podľa očakávania tropický dažďový prales.

Stojí tiež za pozornosť, že v rámci činnosti globálnej skupiny pre ekologickú integritu (*Global Ecological Integrity Group*) WESTRA & LEMONS (2007) spájajú ekologické, sociálne, etické a právne aspekty hodnotenia tejto integrity. Poukazujú na krízu súčasného socioekonomického systému a na akútnu potrebu zahrnúť koncepciu ekologickej integrity do decíznych procesov. Z tohto pohľadu rozširujú ekologickú etiku aj na koncepciu ľudských práv, participatívnu demokraciu, dobré vládnutie a pod.

Zhrnutie kapitoly 7

Revízia koncepcie udržateľnosti

- **Tri základné argumenty pre revíziu koncepcie udržateľnosti sú**: 1) Ekologický argument, podľa ktorého rozvoj za cenu dezintegrácie život udržiavajúcich systémov nás približuje ku hrane ekologického a tým aj civilizačného kolapsu. 2) Sociálny argument, podľa ktorého sociálne asymetrický svet, v ktorom pokračuje honba za ziskami 1 % najbohatších (na úkor miliárd ostatných) zvyšuje entropizáciu spoločnosti. 3) Etický argument, podľa ktorého cenou za nezmyselný blahobyt najbohatších je úbytok integrity ekologických, sociálnych aj kultúrnych systémov a erózia vyšších etických princípov.
- **Príkladom ekologického argumentu** o neudržateľnosti súčasných postupov sú aj nepriaznivé environmentálne vplyvy priemyselného poľnohospodárstva, ktoré je dnes dominantným spôsobom produkcie potravín. Zelená revolúcia zo 60. až 80. rokov minulého storočia viedla k výraznému zvýšeniu produkcie – využívaním vysokej mechanizácie a vysokými vstupmi minerálnych hnojív a ďalších agrochemikálií, najmä pesticídov. Cenou za to sú však rozsiahle nepriaznivé environmentálne vplyvy, ktoré sa prejavujú najmä v strate a degradácii pôdy, v znečisťovaní vody a ovzdušia, v intoxikácii organizmov a v dramatickom úbytku biodiverzity v poľnohospodárskej krajine.
- Integráciu subsystémov sociálno-ekologického systému (SES) do hierarchicky vyššieho celku predstavuje model **udržateľného sociálno-ekologického systému** (UD-SES). Jednotlivé vrstvy (piliere) udržateľnosti tu už nevystupujú ako nezávislé, ale sú vnorené do hierarchicky vyššieho celku SES, ktorý definuje ich limity, pričom vyššie vrstvy sú závislé od limitov nižších vrstiev. Podľa tohto modelu sa už o primárnych ekologických limitoch nevyjednáva (ako je tomu v terajšom modeli udržateľnosti), pretože ich rešpektovanie je nevyhnutné pre samotnú existenciu civilizácie.

- Ak spoločnosť **primárne ekologické limity** definované nosnou ekologickou vrstvou nerešpektuje, po ich prekročení dochádza k neudržateľne vysokej entropizácii a tým k degradácii až dezintegrácii ekosystémov a ďalších život udržiavajúcich systémov. Na existenčnej ekologickej vrstve sa nachádza primárna sociálna vrstva, ktorá definuje **primárne sociálne limity** v zmysle Maslowovej pyramídy ľudských potrieb, ku ktorým sme priradili aj sociálnu spravodlivosť, solidaritu a nutnosť rešpektovať dôstojnosť každého človeka. Až nad touto vrstvou sa nachádzajú vzájomne interagujúce klasické piliere udržateľnosti: environmentálny, sociálny, ekonomický a kultúrno-technologický pilier.
- **Udržateľné poľnohospodárstvo**: Okrem produkcie potravín musí šetriť prírodné zdroje a minimalizovať negatívne vplyvy na pôdu, vodu, ovzdušie a biodiverzitu, rešpektovať prirodzené ekologické procesy a zložitosť a integritu ekosystémov a limity ich ekologickej únosnosti. To si vyžaduje znížiť vstupy fosílnych palív, minerálnych hnojív a pesticídov a obnoviť zelenú infraštruktúru poľnohospodárskej krajiny. Fakt, že pre spoločnosť sú dôležité aj jej mimoprodukčné ekosystémové služby si vyžaduje striktnú ochranu prírodného kapitálu, ako ich generátora. Udržateľné poľnohospodárstvo preto musí byť multifunkčné, okrem produkcie potravín sa jeho cieľom musí stať aj správcovstvo a ochrana ekosystémov a krajiny. Navyše aj poľnohospodárstvo sa nevyhnutne musí adaptovať na postupujúcu zmenu klímy.
- S neudržateľne vysokou entropizáciou ekosystémov a Zemského systému súvisí aj **hľadanie nových modelov udržateľnosti na biofyzikálnom základe**. Viacerí autori spájajú túto udržateľnosť s rastom exergie v sociálno-ekologickom systéme pri súčasnom znížení entropizácie ekosystémov. V praxi sa však nedá zabezpečiť, aby ľudské aktivity neviedli ani ku krátkodobému úbytku obsahu kvalitnej energie v ekosystémoch a k nárastu ich entropie. Vhodným predpokladom obnovy ich integrity sa javí nahradenie koncepcie rozvoja, chápaného často ako expanzia, koncepciou vývoja spoločnosti.
- Príklad kvalitatívneho vývoja v poľnohospodárstve predstavuje **organické poľnohospodárstvo (OP)**, v SR a v ČR nazývaného ekologické poľnohospodárstvo. Ide o systém produkcie nutrične bohatých a ľudské zdravie neohrozujúcich potravín, ktorý chráni biodiverzitu a prirodzené prírodné procesy. OP podporuje prirodzené procesy udržania a obnovy úrodnosti pôdy a jej ochrany pred eróziou, vrátane geologického a biologického kolobehu látok, posilnenia pôdnej mikrobiálnej aktivity aj schopnosti pôdy zadržiavať vodu. Vylúčené je používanie priemyselných minerálnych hnojív a ďalších agrochemikálií, namiesto nich sa používajú organické hnojivá. Inherentnou povinnosťou organicky hospodáriaceho farmára je tiež ochrana biodiverzity, ktorá mu súčasne pomáha potláčať hospodárskych škodcov.

Ekosystémové služby a ekosystémový prístup

- Ekosystémové služby sú ľudskou spoločnosťou využívané konkrétne úžitky z ekosystémov, t.j. tie ich funkcie, ktoré zabezpečujú jej existenciu v pradive života, ako aj ekonomickú prosperitu. To dobre ilustruje **kaskádový model**, ktorý znázorňuje vzťahy medzi biofyzikálnym základom funkcií a služieb ekosystémov a ich využívaním v socioekonomickom systéme. Aj tu môžeme uplatniť antropocentrické hľadisko *sensu stricto*, kedy uvažujeme o využívaní funkcií ekosystémov iba z pohľadu človeka, alebo širšie antropo-ekocentrické hľadisko, v ktorom si už uvedomujeme etickú aj ekologickú nevyhnutnosť zdieľať funkcie ekosystémov a ich služby s mimoľudskými formami života.
- V rámci Európskej environmentálnej agentúry bola vytvorená **Spoločná medzinárodná klasifikácia ekosystémových služieb,** ktorá člení ES už iba na tri kategórie – zásobovacie (produkčné), regulačné a udržiavacie, a na kultúrne služby. Pre porovnávanie kapacity rôznych krajín poskytovať ES a zmien týchto kapacít je dôležité mapovanie a hodnotenie ekosystémových služieb.
- Základné prístupy k hodnoteniu ES sú biofyzikálne, sociokultúrne, finančné a integrované. V súčasnosti najrozšírenejšie, **integrované hodnotenie** kombinuje viacero prístupov. Často vychádza z maticovej metódy, v ktorej sa jednotlivým ekosystémom priraďuje číselná hodnota z určitej škály, ktorá vyjadruje ich kapacitu poskytovať príslušnú ekosystémovú službu. Následne s využitím ma-

povania ekosystémov v systéme GIS je možné kvantifikovať tento potenciál, kapacitu ekosystémových služieb pre jednotlivé typy ekosystémov v reálnej krajine alebo pre jednotlivé krajinné celky. Po zisťovaní požiadaviek spoločnosti je možné analogicky vyhodnotiť reálne toky využívaných ES.

- S revíziou koncepcie udržateľnosti súvisí **ekosystémový prístup,** ktorý rešpektuje prirodzené vzťahy medzi prvkami a celkom ekosystému aj človekom. V podstate znamená **integrovaný manažment prírodných zdrojov**, pričom človeka vníma ako integrálnu súčasť ekosystémov (správnejšie sociálno-ekologických systémov). K najznámejším aplikáciám tohto prístupu patrí napr. identifikácia a tvorba horizontálnych ekologických sietí v krajine, participatívny prístup v ochrane prírody a environmentálna certifikácia v lesnom hospodárstve, poľnohospodárstve a turizme.
- Z ekosystémového prístupu, pri rešpektovaní kľúčových charakteristík ekologických systémov vyplývajú aj početné implikácie pre manažment ekosystémov, ktorými sa podrobne budem zaoberať v druhom diele učebnice. V tomto diele sme načrtli niektoré implikácie vyplývajúce zo samotnej podstaty ekologickej zložitosti. Každý ekologický (aj sociálno-ekologický) systém má svoju **prirodzenú úroveň zložitosti,** pri ktorej je jeho vitalita najvyššia. Udržanie resp. obnova zložitosti štruktúry a správania preto patrí k podmienkam zabezpečenia funkčnosti celku a poskytovania ekosystémových služieb.
- Ekosystémový prístup vychádzajúci z vedeckých štúdií ekológie lesa poskytuje východiská aj pre pochopenie procesov v lesných ekosystémoch. V súvislosti so zmenou klímy sa prognózujú jej dopady na lesné ekosystémy, smerom zníženia produkcie vplyvom sucha, resp. aj jej zvýšenia vplyvom predĺženia vegetačnej sezóny, rýchlejšieho rozkladu organickej hmoty a tým vyššej dostupnosti živín. V lesoch severnej pologule sa očakáva posun produkčného optima smerom od rovníka na sever a do vyšších nadmorských výšok. Očakávané dopady na produkčnú funkciu lesov Slovenska sú nepriaznivé, produkciu zrejme nebude možné udržať na súčasnej úrovni, pretože výmery porastov vo vyšších nadmorských výškach, kam sa presúva produkčné optimum, sú menšie, ako výmery porastov vo vegetačných stupňoch, kde sú produkčné optimá drevín v súčasnosti.
- Ekosystémový prístup sa uplatňuje aj pri manažmente Biosférickej rezervácie Poľana, ktorej územie je rozdelené na tri zóny, z nich každá má svoju základnú funkciu: ochranársku, rozvojovú a podpornú. Zhruba 90 % rozlohy CHKO BR Poľana pokrývajú lesy, charakteristické je prelínanie sa panónskych a horských druhov. Až do roku 2010 sa v tejto BR zabezpečovala najmä ochranárska funkcia, na úkor rozvojovej a logistickej. Opúšťanie tradičného extenzívneho obhospodarovania kosných lúk a pasienkov, ktoré sú pre Poľanu a Podpoľanie charakteristické, viedlo k ich zarastaniu a k zníženiu biodiverzity pôvodne druhovo bohatých rastlinných spoločenstiev. Preto Koordinačná rada BR Poľana na participatívnom princípe navrhla inovácie v manažmente územia a v spolupráci s miestnymi obyvateľmi a autoritami bol spracovaný návrh rozšírenia prechodnej zóny BR o výnimočné historické krajinné štruktúry a tento bol na IV. Svetovom kongrese BR v roku 2016 v Lime aj prijatý.

Východiská a možnosti hodnotenia ekologickej zložitosti a ekologickej integrity

- Štrukturálna zložka ekologickej zložitosti (podobne aj ekologickej integrity) zahŕňa hodnotenie fyzickej štruktúry ekosystému (napr. vertikálnej výstavby vegetácie), ako aj jeho druhovej diverzity alebo diverzity biotopov. V našich štúdiách bola táto zložka indikovaná **druhovou diverzitou cievnatých rastlín**, pričom okrem štandardného Shannonovho indexu sme v našich experimentoch využili aj ďalšie, tzv. indexy pravdivej diverzity, ktorých výhodou je vyššia rozlišovacia schopnosť.
- Na druhovú diverzitu nadväzuje kompozícia, druhová skladba a abundancia jednotlivých druhov v spoločenstvách a ekosystémoch, ktorá je v prípade rozlišovania zastúpenia cudzích, inváznych synantropných a pôvodných druhov aj vhodným indikátorom integrity ekosystému. **Ekologicky integrovaný systém** je totiž celistvý, vitálny, funkčný a autentický, má prirodzené druhové zloženie. Kompozíciu sme riešili na báze druhovej skladby vegetácie a hodnotili podľa pôvodných indexov.
- Biologická a ekologická zložitosť sa neobmedzuje iba na fyzickú štruktúru, ale zahŕňa aj zložitosť v nej prebiehajúcich procesov (správania systému). Podľa termodynamickej teórie sa zložitosť organizácie zvyšuje s rastúcim prísunom energie, preto schopnosť zachytenia a disipácie energie patrí

k významným indikátorom miery usporiadanosti ekologického aj sociálno-ekologického systému.

- **Indikácia funkčnej zložky ekologickej komplexity** vychádza z disipatívnych procesov, ktoré využívajú voľnú energiu a jej časť transformujú na energiu nižšej kvality. Čím je prísun energie do systému vyšší, tým je systém zložitejší, za podmienky dostatku ďalších zdrojov. Mieru usporiadanosti systému, osobitne funkčnú zložku komplexity, dobre indikuje schopnosť systému účinne zachytiť slnečnú energiu, využiť ju na rozvoj vnútornej organizácie a súčasne jej časť disipovať.
- **Účinnosť disipácie slnečnej energie ekosystémom** sa premieta aj do jeho povrchovej teploty (čím vyššia disipácia, tým chladnejší povrch). Z hľadiska energetických výstupov je najdôležitejším mechanizmom, ktorý ochladzuje listy rastlín, evapotranspirácia. K dobrým proxy indikátorom disipácie slnečnej energie preto patria aj indikátory teploty povrchu a jej zmien.
- Ekologickú integritu spoločenstva a ekosystému môžeme hodnotiť viacerými spôsobmi, zväčša **porovnávaním atribútov hodnoteného a referenčného ekosystému**. Mierou ekologickej integrity je tu „ekologická vzdialenosť" hodnoteného systému k referenčnému prírodnému vzoru, ktorá sa týka výstavby fyzickej štruktúry, kompozície (napr. druhovej skladby resp. skladby krajinných prvkov), funkčnosti (medzidruhových interakcií a tokov energie, látky a informácie cez hranice susedných ekosystémov). K referenčným normatívom patria charakteristiky pôvodných prírodných ekosystémov a krajín, divočiny, ktoré môžeme získať z opisov potenciálnej prirodzenej vegetácie.
- Meranie na báze multimetrického indexu biologických podmienok rozpracoval James Karr. Jeho **index biologickej integrity** (IBI) sladkovodných ekosystémov vychádza z výskytu indikačných druhov a ich synúzií. Biologickú integritu definuje ako schopnosť *„podporovať a udržiavať rovnovážne, integrované a adaptívne spoločenstvá organizmov..."* s plným rozsahom tých prvkov a procesov, ktoré možno očakávať v prirodzenom biotope daných druhov v ich prirodzenom areáli.
- Pri manažmente národných parkov Kanady sa ekologická integrita hodnotí podľa odhadov **ekologického stavu vybraných typov ekosystémov**, ako sú lesy, trávne porasty, sladkovodné ekosystémy a mokrade, označované ako indikátory. Ich stav sa hodnotí podľa vybraných ekologických atribútov. Následne sú komunikované smerom decíznej sfére a zainteresovaným stranám.

Kontrolné otázky

1) Aké sú základné argumenty hovoriace o neudržateľnosti súčasných postupov? Viete uviesť nejaký príklad na ekologický argument (nemusí byť iba o vplyvoch priemyselného poľnohospodárstva).
2) Čo je to sociálno-ekologický systém? Kedy hovoríme, že je tento systém udržateľný?
3) V čom spočíva revízia koncepcie udržateľnosti na biofyzikálnom základe?
4) Charakterizujte základné princípy organického (ekologického) poľnohospodárstva.
5) Čo sú to ekosystémové služby a aké typy ekosystémových služieb poznáte?
6) V čom spočíva podstata finančného oceňovania ekosystémových služieb?
7) V čom spočíva ekosystémový prístup? Ako by ste ho aplikovali v lesnom hospodárstve?
8) Aké sú implikácie zložitosti ekosystému pre manažment ekosystémov v chránenom území?
9) Z čoho vychádza multimetrický index biologickej integrity (IBI)?
10) Ako sa koncepcia EI využíva pri hodnotení stavu národných parkov Kanady?

Kritické zamyslenie

1) Je možné zabezpečiť dostatok potravín pre ľudskú populáciu a súčasne ochrániť životné prostredie?
2) V čom vidíte prínosy a v čom riziká finančného spôsobu oceňovania ekosystémových služieb?
3) Ako vidíte budúcnosť Biosférickej rezervácie Poľana z pohľadu obnovy a udržania tradičného extenzívneho hospodárenia na lúkach a pasienkoch, ktoré prispelo k ich vysokej biodiverzite?

Príloha:

Jedna z možných ciest hodnotenia ekologickej zložitosti a integrity ekosystémov

Podľa viacerých autorov indikátory ekologickej zložitosti a integrity by mali reflektovať ich jednotlivé rozmery: vertikálnu výstavbu fyzickej štruktúry (napr. pokryvnosť jednotlivých vegetačných etáží), horizontálnu kompozíciu (napr. druhovú skladbu rastlinného spoločenstva) a funkčnosť, ktorá zahŕňa rozmanité vnútrodruhové a medzidruhové interakcie, ale aj toky hmoty, energie a informácie v eko-systéme. Jeden z indikátorov tejto funkčnosti je možné vyjadriť aj prostredníctvom schopnosti ekosystému zachytávať, transformovať, využívať a v konečnom dôsledku disipovať slnečnú energiu.

P1 Použitá metodika

Z množstva dostupných metód sme vybrali iba niektoré, ktoré umožňujú relatívne jednoduchý výpočet vybraných čiastkových indikátorov ekologickej zložitosti a ekologickej integrity, pričom jedným z cieľov výskumu bolo aj overiť praktickú využiteľnosť používaných metód. Pri hodnotení ekologickej komplexity a integrity ekosystémov sme postupovali v troch krokoch:

1) Indikácia funkčnej zložitosti ekosystému prostredníctvom hodnotenia záchytu a disipácie slnečnej energie vegetačnou zložkou ekosystému.
2) Indikácia horizontálnej štrukturálnej zložitosti resp. kompozície ekosystémov prostredníctvom hodnotenia druhovej diverzity cievnatých rastlín.
3) Indikácia horizontálnej štrukturálnej integrity nepriamo cez hemeróbiu, antropogénnu zmenu druhového zloženia rastlinných spoločenstiev v podobe synantropizácie a výskytu inváznych druhov, kým naopak, táto integrita sa zvyšuje s rastúcim zastúpením pôvodných druhov.

P1.1 Indikátory disipácie a využitia slnečnej energie

Prezentované indikátory vychádzajú z teórie, že ekosystémy sa vyvíjajú tak, aby disipovali čo najviac slnečnej energie. Kapacita ekosystému (predovšetkým jeho vegetačného krytu) disipovať energiu je preto dobrým proxy indikátorom jeho funkčnej zložitosti, ktorá vychádza z aplikácie druhého termodynamického zákona (KAY et al. 2001). Súčasne sa rôzne ekosystémy odlišujú svojou kapacitou zachytávať, využívať a disipovať túto energiu, čo ich umožňuje medzi sebou porovnávať.

Priame indikátory

Na hodnotenie disipácie slnečnej energie sa odporúčajú rôzne indexy, ich prehľad podávajú MAES et al. (2011), podľa ktorých je možné fenomén disipácie slnečnej energie využiť na odhad ekologického stavu ekosystémov, keďže táto disipácia sa zvyšuje nielen smerom k vyšším sukcesným štádiám, ale aj smerom od narušených ekosystémov k prirodzeným. Poukázali aj na to, že viaceré indexy indikujúce disipáciu slnečnej energie sú v silnej vzájomnej korelácii. V predkladanej štúdii sme sa preto obmedzili iba na dva najvhodnejšie indexy: index SED, disipácie slnečnej energie ekosystémom a index SEC, záchytu energie ekosystémom.

Základom väčšiny z nich je meranie zložiek radiačnej bilancie systému atmosféra – ekosystém (pozri kapitolu 5). Čistú energiu získanú ekosystémom, vyjadruje vzorec: $R_n = Q_{in} * (1 - \alpha) – (L_{out} – L_{in})$, kde Q_{in} je globálny tok krátkovlnného slnečného žiarenia k povrchu ekosystému, α je albedo povrchu, L_{out} je dlhovlnné IR žiarenie emitované povrchom, L_{in} je IR žiarenie vyžiarené späť smerom k zemskému povrchu skleníkovými plynmi atmosféry (QUATROCHI & LUVALL 1999).

Indikátor kapacity ekosystému disipovať slnečnú energiu na energiu nižšej kvality – index SED (*Solar Energy Dissipation*, KAY et al., 2000, 2001). SCHNEIDER & KAY (1994) kvantifikujú indikátor SED podľa veľkosti čistého toku energie transformovanej ekosystémom na energiu nižšej kvality, ktorá je vztiahnutá k reálnemu toku absorbovaného žiarenia:

$$SED = R_n/[Q_{in} * (1-\alpha)] = [(Q_{in} - Q_{out}) – (L_{out} – L_{in})] / (Q_{in} – Q_{out}) = 1 – (\varepsilon\sigma T^4 – L_{in}) / [Q_{in} * (1-\alpha)], \quad (1)$$

kde α je albedo povrchu ekosystému a ε je jeho emisivita (MAES et al. 2011; SABO 2013). SABO et al. (2011a) uprednostňujú termín účinnosť disipácie energie (nie jej efektívnosť), pretože smerom ku klimaxu síce ekosystém disipuje viac energie, ale vo vzťahu k objemu biomasy je rýchlosť tejto disipácie menšia ako v nižších sukcesných štádiách (WÜRTZ & ANILLA 2010).

Indikátor kapacitu záchytu slnečnej energie ekosystémom – index SEC (*Solar Energy Capture,* LIN et al. 2009) hodnotili kapacitu ekosystému zachytiť a transformovať slnečnú energiu. Vyjadruje ju vzorec:

$$SEC = [(Q_{in} - Q_{out}) – (\sigma * \varepsilon_{povrchu} * T_{povrchu}^4 – L_{in})] / Q_{in}, \quad (2)$$

v ktorom je tok slnečnej energie transformovanej ekosystémom vztiahnutý iba k toku žiarenia smerujúceho na povrch ekosystému a preto vyjadruje skôr zachytenú ako disipovanú energiu.

Keďže rozdiely medzi ekosystémami sa zvyšujú s veľkosťou toku slnečného žiarenia, pre merania bilancie žiarenia za účelom kvantifikácie indikátorov SED a SEC sú najvhodnejšie série jasných, teplých a málo veterných dní počas letných anticyklonál. Merania je potrebné realizovať buď v prekrývajúcich sa časových intervaloch alebo krátko po sebe za veľmi podobných meteorologických podmienok.

Nepriame, proxy teplotné indikátory

Možnosti proxy indikátorov disipácie slnečnej energie demonštrovali QUATTROCHI & LUVALL (1999) a AERTS et al. (2004) meraniami teploty zemského povrchu vo východnej Afrike termickým snímačom umiestneným na lietadle. Takto získané údaje preukázali, že ak sú ostatné kritické premenné ekosystému relatívne konštantné (teplota ovzdušia, vlhkosť pôdy, geologický podklad, topografické parametre), potom je jeho povrch tým chladnejší, čím ekosystém účinnejšie disipuje slnečnú energiu. K dobrým proxy indikátorom preto patrí aj teplota jeho povrchu a jeho teplotná inertnosť.

Indikátor teplotnej pufračnej kapacity ekosystému – index TBC (*Thermal Buffer Counter*, AERTS et al. 2004) vyjadruje účinnosť homeostatického mechanizmu, ktorým sa ekosystém vyrovnáva s prísunom energie a zabraňuje svojmu prehriatiu.

$$TBC = \Delta t/\Delta T, \quad (3)$$

kde Δt je časový interval, za ktorý sa zmení teplota T povrchu ekosystému o ΔT stupňov Celsia. Vyjadruje termálnu inertnosť ekosystému voči prísunu energie.

Indikátor teplotnej odozvy ekosystému – index TRN (*Thermal Response Number*, LUVALL & HOLBO 1989; LIN et al. 2009) vyjadruje množstvo ekosystémom zachytenej energie slnečného žiarenia, potrebné na zmenu teploty povrchu o jednotku teploty (1 °C) .

$$TRN = (\Sigma_{t1,t2} R_n\Delta t) / \Delta T, \quad (4)$$

kde $\Sigma_{t1,t2} R_n\Delta t$ je energia absorbovaná ekosystémom v časovom intervale $t_2 – t_1$. TRN menej závisí od zmien meteorologických podmienok ako TBC.

Praktické hodnotenie funkčnej zložky ekologickej zložitosti

V rokoch 2009 až 2016 sme overovali a rozvíjali možnosti praktického hodnotenia čiastkových indikátorov zložitosti a integrity ekosystémov v oblasti Piešťan a Dolnovážskej nivy, Podlavických výmoľov pri Banskej Bystrici, Tematínskych vrchov v Považskom Inovci, krajinnej mozaiky v blízkosti obce Jasenie pod Nízkymi Tatrami a tiež výseku krajiny nad osadou Štefanová v Kriváňskej Fatre. Získané výsledky boli prezentované vo viacerých prácach (SABO et al. 2009, 2011a, 2017; SABO 2013, SABO & ŠKODOVÁ 2016). V tejto kapitole sumarizujeme výsledky získané pri hodnotení indikátorov SED a SEC

na úpätí Tematínskych vrchov, v blízkosti rovnomenného územia európskeho významu.

Disipácia slnečnej energie ekosystémom sa mení v priebehu dňa aj vegetačnej sezóny a závisí aj od ďalších meteorologických podmienok, ktoré ovplyvňujú toky žiarenia a procesy evapotranspirácie, napr. vlhkosť ovzdušia a pôdy, smer a sila vetra. K meraniu viacerých z týchto premenných sme v priebehu našich experimentov nemali potrebné zariadenia a prístroje. Napriek tomu sú najmä indikátory SED a SEC dostatočne výpovedné, pretože pri porovnávaní ekosystémov sú dôležité relatívne vzdialenosti indikátorov ich funkčnej zložitosti vztiahnuté k funkčnej zložitosti referenčného prírodného ekosystému. (Analogicky to platí aj pre indikátory štrukturálnej zložitosti.)

Niektoré aspekty praktického hodnotenia ekologickej zložitosti

K dispozícii sme mali dva stožiare do výšky 2,5 až 10 m. Výška stožiarov a ramena nosníka senzorov bola nastavená tak, aby senzory snímali povrch ekosystému z výšky približne 1 až 1,5 m nad vegetáciou.

Na meranie boli použité, dva pyranometre na meranie krátkovlnného globálneho slnečného žiarenia smerujúceho k povrchu ekosystému a od neho odrazeného žiarenia (spektrálny rozsah 305 – 2 800 nm). Na meranie toku dlhovlnného IR žiarenia z povrchu ekosystému a IR žiarenia emitovaného späť k zemskému povrchu skleníkovými plynmi sa použili dva pyrgeometre (spektrum 4 500 – 50 000 nm).

Záznamníky každú minútu zaznamenávali priemer zo 6 meraní. Údaje získané z pyranometrov vstupovali do výpočtov priamo, údaje z pyrgeometrov predstavovali rozdiel tokov IR žiarenia zo snímača a meraného smeru. Tieto údaje sme spolu s teplotou telesa snímača použili na výpočet reálnych tokov IR žiarenia.

Emisivitu aktívneho povrchu (mieru schopnosti vyžarovať energiu) sme pri výpočtoch teploty povrchu porastu (z ním emitovaného IR žiarenia) pre každý meraný povrch nastavili podľa dostupných tabuľkových zdrojov (HRVOĽ & TOMLAIN 1997; WITTICH 1997; RUBIO et al. 1997) pri zohľadnení jeho špecifík. Tu treba poznamenať, že keďže vychádzame z premenných získaných pyranometrami a pyrgeometrami, prípadný chybný odhad emisivity povrchu výpočet účinnosti disipácie energie nijako neovplyvní.

P1.2 Indikátory zložitosti kompozície a integrity ekosystému

Indikátory zložitosti kompozície

Súčasťou hodnotenia ekologickej komplexity bolo aj hodnotenie druhovej diverzity cievnatých rastlín. Vychádzali sme z fytocenologických zápisov, pričom pokryvnosť rastlín na ploche zápisu sme hodnotili podľa rozšírenej 9-stupňovej Braun-Blanquetovej stupnice. Jej prevod na numerickú formu za účelom aproximácie percentuálneho vyjadrenia pokryvnosti sme realizovali podľa van der MAALERA (2007), pričom sme použili stupnicu so strmším nárastom pokryvnosti.

Štrukturálnu zložitosť druhového zloženia vegetácie sme na každej ploche fytocenologického zápisu hodnotili prostredníctvom viacerých indexov diverzity, a to štandardne využívaných – známeho Simpsonovho indexu a Shannonovho indexu, aj novšie odporúčaných – Hillových čísel, nazývaných aj „indexy pravdivej diverzity“ (*true diversity indexes*, JOST 2006; TUOMISTO 2011).

Hillove čísla prinášajú reálnejší obraz diverzity (neskreslenej vyrovnanosťou spoločenstva) preto sa nazývajú aj „*pravdivé indexy diverzity*“ (*true diversity indexes* – JOST 2006; TUOMISTO 2011). Prvý z nich, pravdivý index diverzity 1. rádu sa odvodí zo Shannonovho indexu nasledovne:

$$^1D = \exp(SW) = \exp\left(-\sum_{i=1}^{S} p_i * \ln p_i\right) = \exp\ \left(-\sum_{i=1}^{S}(n_i/N) * \ln(n_i/N)\right) \quad 5)$$

kde p_i je relatívna významnosť taxónu, n_i je hodnota jeho významnosti (v našom prípade pokryvnosť), N je súčet hodnôt významnosti všetkých taxónov a S je počet rôznych taxónov v území.

Zo Simpsonovho indexu môžeme analogicky odvodiť pravdivý index diverzity 2. rádu:

$$^2D = 1/\sum_{i=1}^{S} p_i^2 = 1/\sum_{i=1}^{S}(n_i/N)^2, \quad (6)$$

Indikátory ekologickej integrity ekosystému

Hodnotenie ekologickej integrity si vyžaduje porovnávanie hodnoteného ekosystému s referenčným prírodným ekosystémom, s pôvodným druhovým zložením. Čím je v hodnotenom systéme viac synantropných, inváznych a iných nepôvodných druhov, tým má väčšiu hemeróbiu, to znamená, že jeho ekologická integrita bude nižšia a naopak. Pojmy synantropizácia, pôvodnosť (*nativeness*) a prirodzenosť (*naturalness*) sa už široko používajú, ale zatiaľ sa iba zriedka hodnotia aj kvantitatívne.

Indexy hemeróbie alebo naopak kvality vegetácie sú zatiaľ vo vývoji. Napr. ANDREAS et al. (2004) prezentujú index floristickej kvality, ktorý vychádza z expertného priradenia koeficientu "konzervatizmu" panelom botanikov každému druhu hodnoteného stanovišťa, spriemerovania takto získaných hodnôt a vynásobenia druhou mocninou počtu druhov. Takto získaný index vyjadruje odolnosť vegetácie voči vonkajším narušeniam.

Iný prístup prezentujú botaničky CIECIERSKA & KOLADA (2014), ktoré počítajú index synantropizácie ako súčasť "indexu makrofytov" pre odhad ekologického stavu jazier v Poľsku. SERAFIN & POGORLEZEC (2011) kvantifikujú synantropizáciu ako relatívne zastúpenie synantropných taxónov vo flóre stanovíšť, čo je však zamieňanie si synatropizácie vegetácie so synantropizáciou flóry.

Nižšie uvádzame pôvodné indexy cudzosti (výskytu a zastúpenia antropofytov), synantropizácie (výskytu a zastúpenia synantropných druhov) a pôvodnosti (výskytu iba pôvodných druhov), ktoré prezentujeme nižšie. Spravidla sa vždy uplatňuje viac kategórií, napr. v prípade cudzích druhov rastlín (*alien species*) – invázne taxóny, nepôvodné archeofyty a nepôvodné neofyty (MEDVECKÁ et al. 2012). Pri ich využití sme vo vytvorených vzorcoch uplatnili rôzne váhy, ktoré reflektujú ich rozdielny význam.

Náš index cudzosti, podielu cudzích druhov ALI sme pre každý zápis počítali podľa vzorca:

$$\mathrm{ALI} = [\ \sum_{m=1}^{A1} (\text{nepôvodný_neofyt}_m) + \sum_{r=1}^{A2} (\text{nepôvodný_archeofyt}_r)\ /N\ ] \quad (7)$$

kde nepôvodný_neofyt$_k$ a nepôvodný_archeofyt$_r$ vyjadrujú pokryvnosť v rámci kategórií nepôvodných druhov, N je pokryvnosť všetkých taxónov, A_1 a A_2 sú počty taxónov v daných kategóriách a S je celkové druhové bohatstvo v zápise.

Pri výpočte indexu synantropizácie SYN sme vychádzali z JURKA (1990), pričom, sme odlíšili obligatórne a fakultatívne synantropné druhy. V druhom prípade treba vždy rozhodnúť, či ide o výskyt taxónu v synantropnom spoločenstve alebo nie. Vzorec pre výpočet indexu synantropizácie je:

$$\mathrm{SYN} = (\sum_{i=1}^{Ssyn} \text{synantropný}_i)\ /N \quad (8)$$

kde obligatórne_synantropný$_i$ a fakultatívne_synantropný$_j$ vyjadrujú pokryvnosť v rámci uvedených kategórií (pre účely tejto štúdie sme zvolili jednoduchšiu a súčasne striktnejšiu klasifikáciu než akú používa JURKO, 1990). S_{syn} je počet synantropných taxónov.

Analogicky sme počítali index miestne nepôvodných, vysadených taxónov:

$$\mathrm{VYS} = (\sum_{i=1}^{Svys} \text{miestne_nepôvodný_sadený}_i)\ /\ N \quad (9)$$

kde miestne_nepôvodný_sadený$_i$ označuje vysadený miestne nepôvodných druh, napr. v prípade Tematínskych vrchov je ním borovica lesná (*Pinus sylvestris*), S_{vys} je celkový počet takýchto druhov.

Vypočítali sme tiež index, ktorý vyjadruje blízkosť zastúpených druhov k pôvodnej divočine (pôvodnosť, prírodnosť). Prítomnosť takýchto druhov znižuje hemeróbiu a zvyšuje ekologickú integritu.

$$\mathrm{NAT} = (\sum_{i=1}^{Snat} (\text{pôvodný_neapofyt}_i)\ /\ N \quad (10)$$

kde pôvodný_neapofyt$_i$ označuje pôvodný druh v ekosystéme, S_{nat} je celkový počet týchto druhov a N je pokryvnosť všetkých taxónov v rámci skúmanej plochy (zodpovedajúcej danému zápisu).

Index NAT môžeme vypočítať aj prostredníctvom inverzie indexov ALI a SYN. V našich novších štúdiách sme tiež hodnotili prírodoochranný význam vegetácie, pričom sme vychádzali z červeného zoznamu

ohrozených druhov a z endemizmu hodnotených druhov rastlín (ELIÁŠ et al. 2015).

Hodnotenie integrity ekosystémov môžeme teda zhrnúť do niekoľkých krokov:

1) z hodnotenia kapacity disipácie slnečnej energie daným ekosystémom resp. povrchom;
2) z hodnotenia funkčnej zložky EI, pričom základom sú indexy SEC alebo SED, ktoré vztiahneme k referenčnému ekosystému, čím získame indexy relatívnej účinnosti disipácie SEC_{rel} a SED_{rel};
3) z hodnotenia kompozície ekosystému (horizontálnej štrukturálnej zložitosti) na báze druhovej diverzity a prirodzenosti druhového zloženia cievnatých rastlín;
4) z hodnotenia štrukturálnej zložky EI na báze parciálnych indexov získaných v kroku 2, pričom základom sú indexy diverzity, ktoré však upravíme v závislosti od indexu prirodzenosti a indexu pôvodnosti (prírodnosti) vegetácie.

P2 Prípadová štúdia hodnotenia ekologickej zložitosti a integrity ekosystémov na úpätí Tematínskych vrchov

V tejto kapitole sumarizujeme výsledky meraní a výpočtov z augusta 2010 na okraji Tematínskych vrchov, prezentované v štúdi SABO et al. (2017). Oproti tejto štúdii pracujeme s jednoduchším výpočtom hemeróbie a pôvodnosti vegetácie. Sústredili sme sa na hodnotenie ekosystémov, ktoré sú ekvivalentom niekdajších spustnutých plôch (dolomitový substrát, lesná cesta) a vegetácie rôznych sukcesných štádií, napr. travinný porast, borievkový krovinný porast a okraje lesa (porast borovice lesnej a duba cerového). Výberové kritériá sa týkali požiadaviek na rozmanitosť stanovíšť, ich vzájomnú blízkosť, s cieľom zabezpečiť rovnaké meteorologické podmienky v deň merania. Ďalšou požiadavkou bol terén s relatívne nízkym sklonom a určitá dopravná dostupnosť kvôli dovozu ťažších meracích zariadení.

Hodnotené ekosystémy na úpätí Tematínskych vrchov

Tematínske vrchy sa tiahnu východne od hrebeňa v strednej časti Považského Inovca (v podcelku Nízky Inovec) a budované sú vápencami a dolomitmi, vytvárajúcimi aj niekoľko sto metrov hrubé vrstvy (MAGLOCKÝ 1979). V centrálnej časti charakterizujú reliéf ploché chrbty a z nich vybiehajúce rázsochy a hlboké údolia. Pôdy predstavujú najmä skeletnaté rendziny (ŠÁLY & ŠURINA 2002). Karbonátové podložie je vysoko priepustné, územie odvodňujú až podzemné vody (významné sú zásoby podzemných vôd pri Lúke nad Váhom). Klíma je teplá, mierne suchá, s priemernou ročnou teplotou vzduchu 9,2 – 9,4 °C (LAPIN et al. 2002). Dlhodobé trendy podľa meracej stanice Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMÚ) v Piešťanoch indikujú teplotu vyššiu ako 10 °C. Priemerné ročné zrážky sú do 600 – 650 mm.

Prirodzenou potenciálnou vegetáciou sú tu podľa MICHALKO et al. (1986) najmä dubovo-hrabové lesy karpatské (*Carici pilosae-Carpinenion* J. et M. Michalko 1985) a dubovo-cerové lesy (*Quercion confertae cerris* Horvat 1954), vo vyšších polohách a na severných svahoch aj bukové lesy. Súčasnú vegetáciu predstavujú zvyšky týchto lesov, ihličnaté a zmiešané lesy s vysadenou borovicou čiernou a b. lesnou, suchomilné travinno-bylinné a krovinové porasty (najmä borievky obyčajnej – *Juniperus communis*).

V minulosti, po odlesnení resp. intenzívnej pastve človekom urýchlená erózia pôsobila až niekoľko sto rokov (MIDRIAK et al. 2011) a viedla k spustnutiu pôd na rozsiahlych plochách zbavených vegetácie. Intenzívne zalesňovanie spustnutých pôd Tematínskych vrchov prebehlo v druhej polovici 20. storočia. Na týchto plochách bola úspešná najmä výsadba borovice čiernej (*Pinus nigra*) a b. lesnej (*P. sylvestris*), v deluviálnych častiach sa uplatnili listnaté dreviny. Vymedzené územie je ohraničené súradnicami 48°39'54,0'' až 48°39'55,5'' severnej zemepisnej šírky a 17°53'56,0'' až 17°53'56,5'' zemepisnej dĺžky. Meracie stanovištia boli situované vo výške približne 216 – 221 m n. m., sklon južne exponovaného svahu bol 2 – 4 ° (na xerotermnej lúke 5 – 7 °).

Zoznam stanovíšť na úpätí Tematínskych vrchov, na ktorých sme v roku 2010 merali zložky bilancie žiarenia alebo povrchovú teplotu a hodnotili sme aj diverzitu a synantropizáciu vegetácie:

- Stanovište T1: Zmiešaný stromový, miestami hájový porast, výrazná dominancia *Pinus sylvestris, Acer pseudoplatanus* a *Pinus nigra,* v krovinovej etáži sú hojné *Juniperus communis* a *Berberis vulgaris.* Nadmorská výška približne 216 - 220 m, sklon 2 – 4°, južná expozícia.
- Stanovište T2: Zmiešaný porast s prevahou listnáčov, viac hájového charakteru, výrazná dominancia *Quercus cerris*, v krovinnej etáži hojnejšia *Juniperus communis.* Nadmorská výška približne 217 – 221 m, sklon ca 2 – 4 °, južná expozícia.
- Stanovište T3: Krovinný borievkový porast na okraji lesa prechádzajúci do lúky s dominujúcou *Juniperus communis,* kužeľ vytváraný vrcholom snímačov najskôr zachytil aj časť priľahlého travinného porastu. Nadmorská výška približne 216 – 220 m, sklon 2 – 4 °, južná expozícia.
- Stanovište T4: Xerotermný travinný porast s dominanciou *Botriochloa ischaeum*, ale tiež s hojnejším zastúpením *Pilosella officinarum, Teucrium chamaedrys* a i. Nadmorská výška ca 214 – 219 m, sklon 5 – 7 °, južná expozícia.
- Stanovište T5: Nespevnená, vyššie zarastajúca lesná cesta s drobivým dolomitovým substrátom – ekvivalent spustnutej pôdy. Sklon 2 – 4 °, južná expozícia.

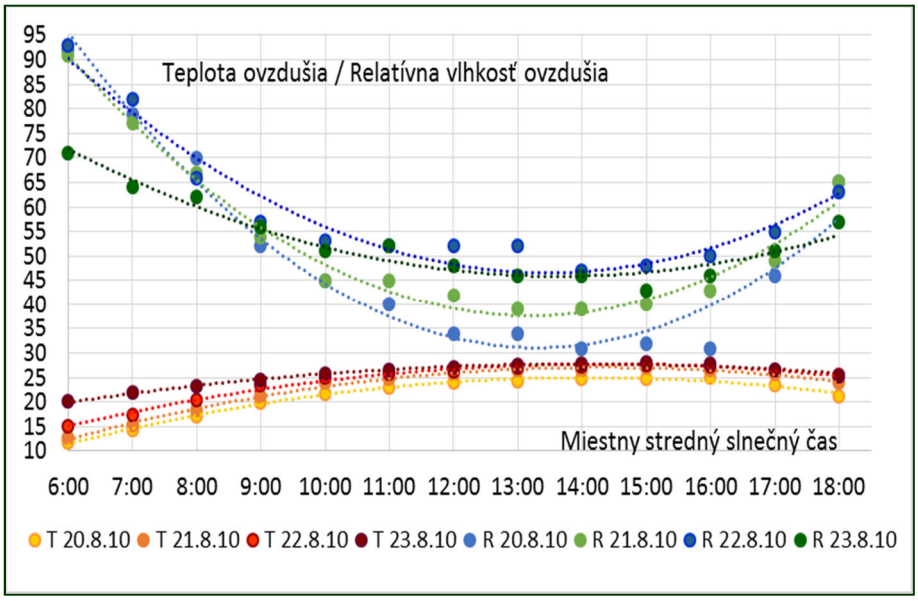
Obr. P1. Lokalita merania na úpätí Tematínskych vrchov pri Lúke nad Váhom. a) T1: hájový porast s dominanciou *Pinus sylvestris* a T3: krovinový borievkový porast (*Juniperus communis*). b) T2: zmiešaný porast s dominanciou *Quercus cerris*, c) T4: Xerotermný travinný porast s dominanciou fúzatky prstnatej (*Botriochloa ischaeum*), d) T5: Nespevnená lesná cesta s dolomitovým substrátom. *Foto:* © Peter Sabo, 2010.

Na stanovištiach T1 – T4 bola hodnotená aj diverzita a abundancia cievnatých rastlín, v prípade odkrytého substrátu povrchu cesty bola meraná povrchová teplota (T5). (Obr. P1)

P2.1 Denné priebehy zložiek bilancie žiarenia a disipácie slnečnej energie

Denný priebeh teplôt ovzdušia a relatívnej vlhkosti v dni merania na meteorologickej stanici Piešťany (táto je najbližšie k hodnotenej lokalite na úpätí Tematínskych vrchov) je na obr. P2.

Z grafu vidieť, že priebeh teplôt ovzdušia v uvedené dni sa silne prekrýva, a do značnej miery to platí aj pre priebeh relatívnej vlhkosti ovzdušia, čo znamená, že meteorologické pomery v uvedené dni boli veľmi podobné a preto merania bilancie žiarenia v tieto môžeme použiť na porovnávanie hodnotených ekosystémov.



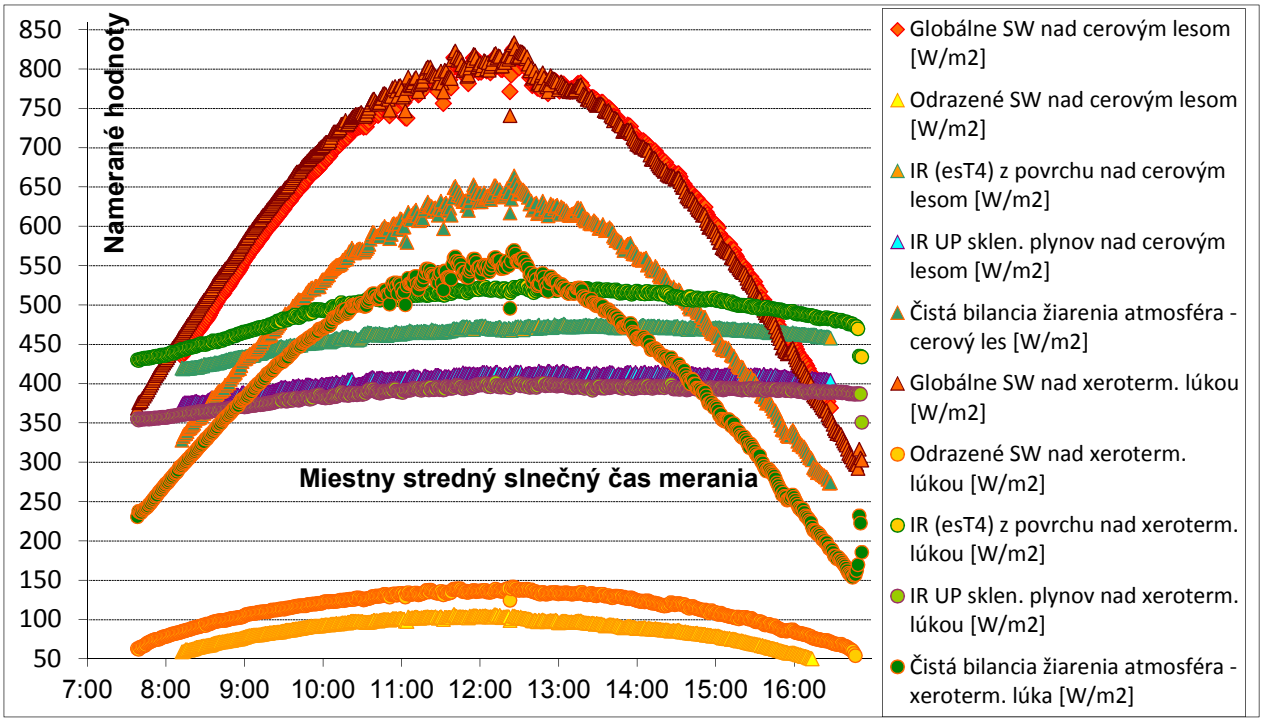
Obr. P2. Denný priebeh teploty ovzdušia a relatívnej vlhkosti na meracej stanici v Piešťanoch, v dňoch merania bilancie žiarenia na úpätí Tematínskych vrchov. *Graf:* Peter Sabo, 2017, *Zdroj údajov*: SHMÚ.

Výsledky nameraných a vypočítaných hodnôt zložiek bilancie slnečného žiarenia, teploty a relatívnej vlhkosti ovzdušia ilustrujeme na obr. P3. V prípade Tematínskych vrchov (najbližšia meteorologická stanica je umiestnená v Piešťanoch) miestny slnečný čas = letný čas – 1 h + 12 min. Vysoký počet získaných hodnôt je dostatočný na získanie pomerne presného obrazu o účinnosti disipácie slnečnej energie rôznymi hodnotenými typmi ekosystémov.

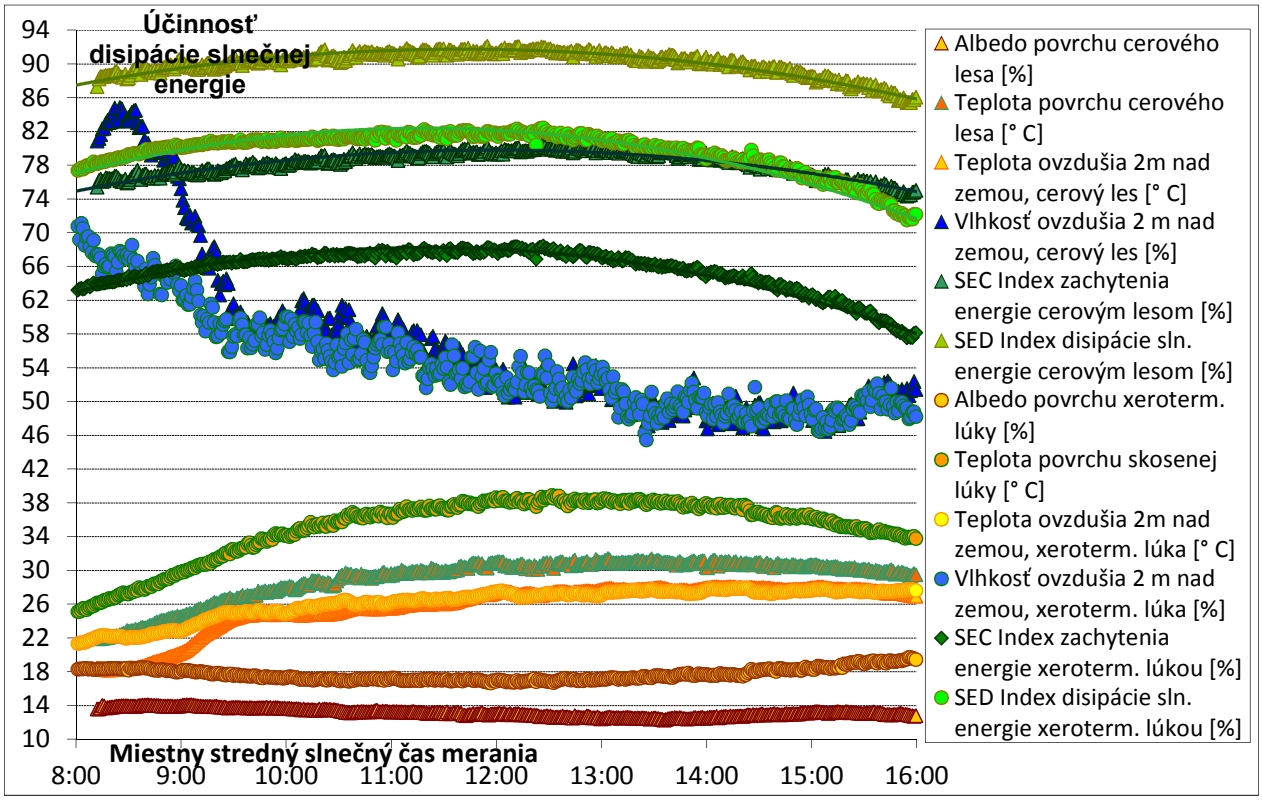
Z ilustrácie vidieť, že čistá bilancia žiarenia využitá ekosystémom (R_n) je výrazne vyššia v prípade cerového porastu ako u xerotermnej lúky. Naopak, albedo lúky (podiel odrazeného žiarenia) je vyššie. Rn cerového porastu v poludňajších hodinách dosahuje 640 $W.m^{-2}$, kým Rn lúky v rovnakom čase dosahuje iba 560 $W.m^{-2}$. Vysvetlenie ponúka teória nerovnovážnej termodynamiky ekosystémov: porast okraja cerového lesa je z hľadiska objemu biomasy aj fyzickej výstavby zložitejší a preto účinnejšie disipuje slnečnú energiu a dokáže jej aj viac využiť pre rozvoj svojej organizácie a výstavbu.

V grafe na obr. P4 uvádzame **denný priebeh účinnosti disipácie slnečnej energie** (vypočítanej z nameraných zložiek bilancie žiarenia systému atmosféra – povrch ekosystému), vypočítaných teplôt povrchu ekosystémov a nameraných teplôt a relatívnej vlhkosti ovzdušia pre ekosystémy okraja cerového lesa (s prímesou ďalších drevín) a xerotermnej lúky. Údaje sú uvádzané pre miestny stredný slnečný čas, ktorý závisí od uhlovej pozície slnka pri jeho zdanlivom pohybe po oblohe.

V prípade Tematínskych vrchov (stanica Piešťany) miestny slnečný čas = letný čas – 1 h + 12 min. Z ilustrácie vidieť takmer 10 % rozdiely medzi účinnosťou disipácie slnečnej energie a takmer 12 % rozdiely záchytu slnečnej energie ekosystémami okraja cerového lesa a xerotermnou lúkou. Takéto rozdiely sú dostatočne veľké na porovnávanie ekosystémov.



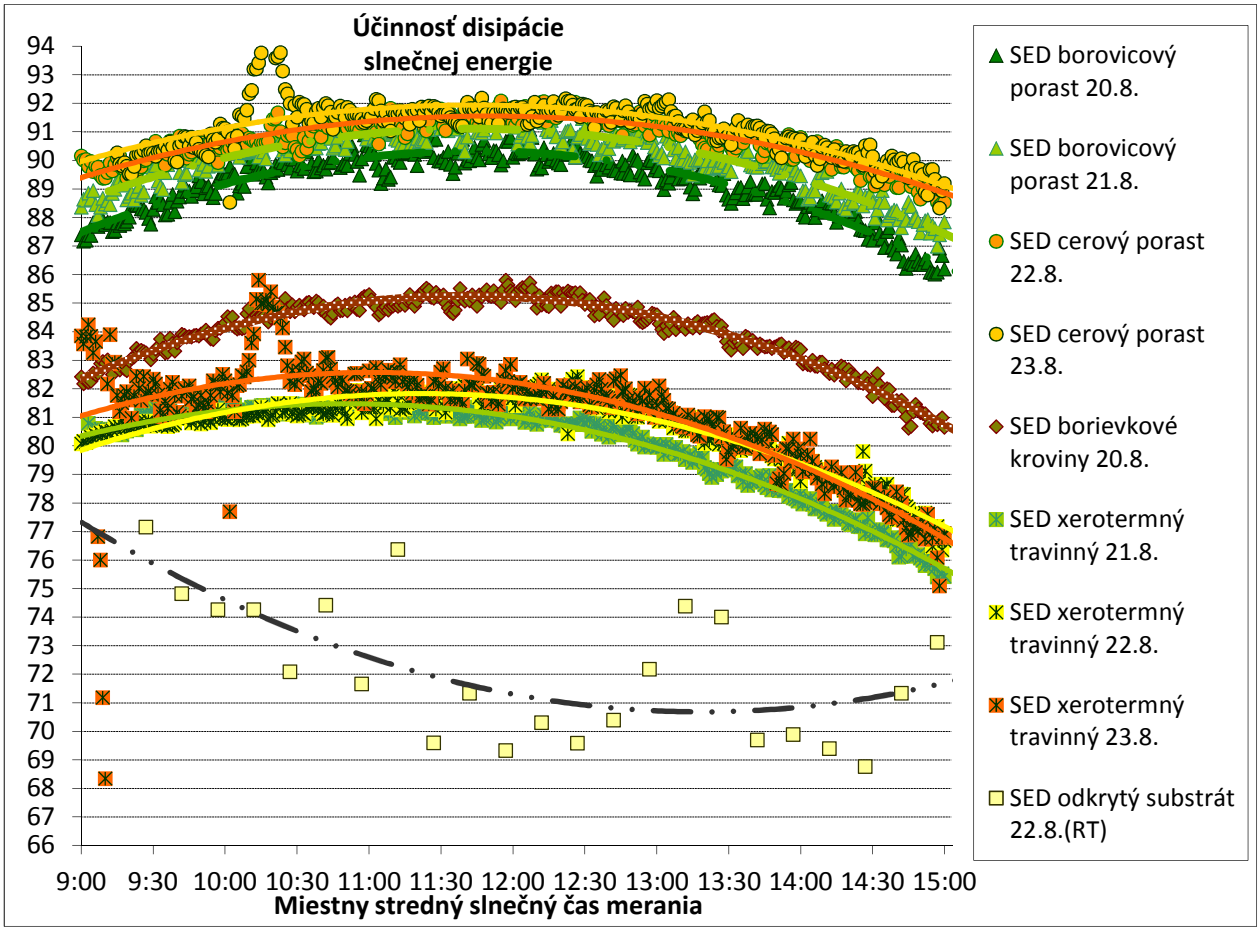
Obr. P3. Graf priebehu nameraných a vypočítaných hodnôt zložiek bilancie žiarenia systému atmosféra – povrch ekosystému dňa 22.8.2010 na stanovištiach T2 a T4 na úpätí Tematínskych vrchov. Hladké tvary priebehu kriviek krátkovlnného aj dlhovlnného žiarenia boli iba veľmi slabo narušené malou vysokou krátkodobou oblačnosťou (medzi 11.50 – 12.50 h). *Graf a údaje*: Peter Sabo, 2017.



Obr. P4. Denný priebeh hodnôt vypočítanej účinnosti disipácie energie, teplôt povrchu ekosystému, albeda povrchu a nameraných hodnôt teplôt a relatívnej vlhkosti ovzdušia dňa 22.8.2010 na stanovištiach T2 a T4 na úpätí Tematínskych vrchov. Za povšimnutie stojí, že malé oscilácie tokov žiarenia pri krátkodobom narušení vysokou oblačnosťou sa na priebehu kriviek disipácie slnečnej energie neprejavili. *Graf a údaje:* Peter Sabo, 2017.

V súlade s teóriu nerovnovážnej termodynamiky je disipácia energie slnečného žiarenia cerovým porastom výrazne vyššia ako v prípade xerotermnej lúky a rovnako to platí aj pre záchyt a využitie energie. Disipácia energie rastie dopoludnia zhruba do 12.00 h miestneho stredného slnečného času a po ňom rýchlejšie klesá. Z ilustrácie vidieť takmer 10 % rozdiel medzi účinnosťou disipácie slnečnej energie a takmer 12 % rozdiel záchytu slnečnej energie ekosystémami okraja cerového lesa a xerotermnou lúkou. Takéto rozdiely sú dostatočne veľké na porovnávanie ekosystémo Vyššia účinnosť disipácie energie cerovým porastom sa premieta aj do nižšej teploty povrchu. Z pribehu teploty povrchov vidieť, že teplota povrchu cerového porastu je v priemere o 4 až 6 °C nižšia ako teplota povrchu xerotermnej lúky, napriek tomu, že albedo cerového porastu je nižšie, čo znamená, že tento porast absorbuje viac energie slnečného žiarenia ako priľahlá lúka.

V grafe na obr. P5. ilustrujeme **denný priebeh účinnosti disipácie slnečnej energie rôznymi ekosystémami, index SED,** v období od 20. augusta 2010 do 23. augusta 2010 v lokalite na úpätí Tematínskych vrchov. Z ilustrácie vidieť veľké rozdiely disipácie slnečnej energie rôznymi ekosystémami. Najvyššiu účinnosť disipácie dosahuje cerový porast, ktorý je tu pôvodný, nasleduje zmiešaný porast s dominanciou borovice lesnej, ďalej porast borievky obyčajnej a napokon xerotermný lúčny ekosystém.

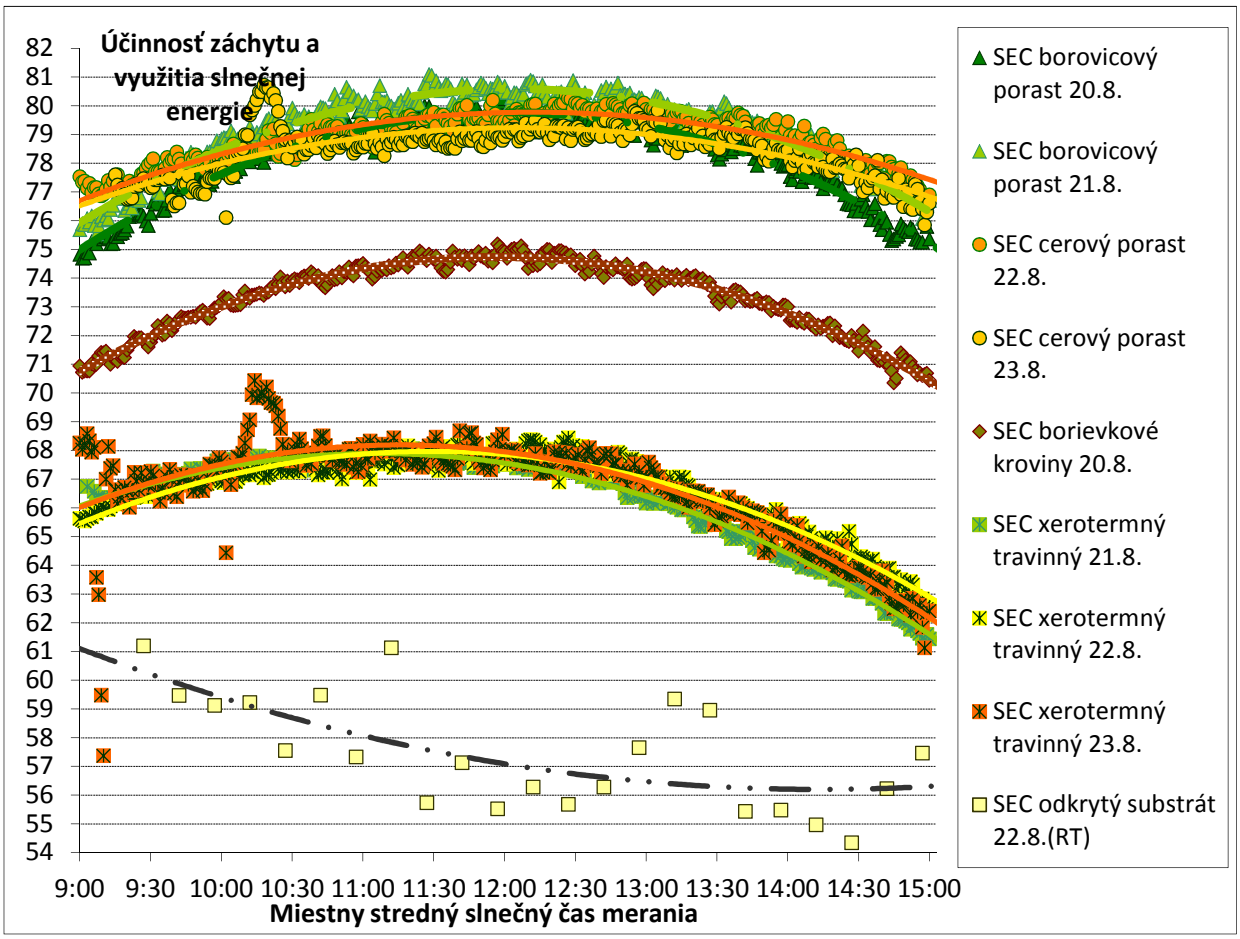


Obr. P5. Porovnanie 6 hodinového priebehu (okolo poludnia miestneho stredného slnečného času) účinnosti disipácie slnečnej energie rôznymi typmi ekosystémov na úpätí Tematínskych vrchov v roku 2010. Skratka RT v legende znamená, že výpočet účinnosti disipácie slnečnej energie odkrytým substrátom vychádzal z meraní teploty povrchu teplomerom Raytec. *Graf a údaje:* Peter Sabo, 2017.

Malé rozdiely hodnôt indexu SED v rámci jednotlivých ekosystémov tiež existujú, najvýraznejšie sú v prípade lúky a borovicového porastu, avšak sú podstatne menšie ako rozdiely medzi ekosystémami. To znamená, že **uvedená metóda je** za rovnakých alebo silne podobných meteorologických podmienok **vhodná na porovnávanie rôznych ekosystémov** a na indikáciu ich zložitosti aj integrity.

Jednou z ciest na odstránenie malého šumu je realizovať väčší počet meraní pre každý ekosystém a získané h odnoty disipácie slnečnej energie spriemerovať. V tabuľkách 7.1 a 7.2 uvedených nižšie preto uvádzamne aj priemerné hodnoty účinnosti disipácie slnečnej energie v časovom intervale 10.30 – 13.30 h okolo poludnia miestneho stredného slnečného času ako aj relatívnu účinnosť tejto disipácie vztiahnutú k rozdielu medzi najväčšími a najmenšími hodnotami disipácie energie.

Pre porovnanie v grafe na obr. P6. ilustrujeme **účinnosť zachytenia a využitia slnečnej energie rôznymi ekosystémami, index SEC** (pre rovnaké ekosystémy a rovnaké časové intervaly pre ktoré sme počítali index SED). Opäť vidieť výrazné rozdiely medzi rôznymi sukcesnými štádiami, ktoré sú dokonca väčšie ako v prípade indexu SED, to znamená, že index SEC má pre dané meteorologické podmienky väčšiu diskriminačnú silu, preto v tabuľkách uvedených nižšie pracujeme práve s týmto indexom.



Obr. P6. Porovnanie 6 hodinového priebehu (okolo poludnia miestneho stredného slnečného času) účinnosti zachytenia a využitia slnečnej energie rôznymi typmi ekosystémov na úpätí Tematínskych vrchov v roku 2010. Skratka RT v legende znamená, že výpočet účinnosti disipácie slnečnej energie odkrytým substrátom vychádzal iba z meraní teploty povrchu teplomerom Raytec. *Graf a údaje:* Peter Sabo, 2017.

P2.2 Absolútna a relatívna účinnosť záchytu slnečnej energie

Z porovnania priebehov hodnôt indexov SED a SEC pre lokalitu Tematínske vrchy na obr. P5 a P6 vyplýva, že **väčšiu diskriminačnú silu**, to znamená najvýraznejšie rozdiely medzi ekosystémami a súčasne minimálny šum v rámci tých istých ekosystémov **má v tomto konkrétnom prípade index SEC**, preto sme ho využili v ďalších výpočtoch pre hodnotenie záchytu slnečnej energie. Keďže vo vegetačnom období sa najviac slnečnej energie minie na evapotranspiráciu, je zrejmé, že disipácia slnečnej energie sa v čase mení, najmä v závislosti od zmien toku žiarenia, v menšej miere od teploty a vlhkosti ovzdušia, rýchlosti a smeru vetra a od vlhkosti pôdy, prípadne od obsahu živín v pôde a pod.

Interpretácia záchytu a využitia slnečnej energie rôznymi typmi zemského povrchu

Z ilustrácií na obr. P5 a P6 a z výsledkov v tabuľky P1 vyplýva niekoľko zovšeobecnení ohľadne využitia koncepcie disipácie a záchytu slnečnej energie na hodnotenie zložitosti ekosystémov.

- Pri hodnotení ekosystémov počas po sebe nasledujúcich dní boli rozdiely hodnôt vztiahnutých k tým istým povrchom minimálne (cca 0,5 – 1 %, výnimočne 2 %). Tieto rozdiely závisia od zmien toku žiarenia, vlhkosti pôdy, teploty a vlhkosti ovzdušia, rýchlosti a smeru vetra. Za podmienky, že dané dni sa minimálne odlišujú veľkosťami týchto veličín, môžeme jednotlivé merania porovnávať.
- Ako referečný ekosystém s najnižšou zložitosťou v danom území môžeme zobrať odkrytý substrát (stanovište T5), ktorý má najnižšiu schopnosť disipácie energie. Aj v tomto prípade však účinnosť záchytu energie prevýšila 50 %, čo je dôsledkom fyzikálnych procesov v zohrievanom substráte. Prevažná časť energie sa tu spotrebuje na akumuláciu tepla v hornine a tepelný tok v nej, a na ohrev vzdušia od tohto povrchu, iba malá časť sa využije na evaporáciu.
- Pri povrchu pokrytom vegetáciou sa účinnosť disipácie zvyšuje smerom k vyšším sukcesným štádiám – najnižšiu mal travinný porast (stanovište T4). Vyššiu vykazujú borievkové kroviny (stanovište T3) a najvyššiu okraje lesných porastov (stanovištia T1, T2) – z technických dôvodov sme mohli merať bilanciu žiarenia iba pre nižšie a dlhšie osvetlené stromy na južnom okraji lesa. Tento trend ilustruje, že vo vegatčnom období sa najviac ekosystémom zachytenej slnečnej energie využije na evapotranspiráciu.
- Ako referečný ekosystém s najvyššou zložitosťou môžeme zobrať ten, ktorý najúčinnejšie disipuje alebo zachytáva slnečnú energiu. V prvom prípade to bol pôvodný cerový porast, v druhom zmiešaný listnato-ihličnatý porast s dominujúcou borovicou lesnou, ktorá tu bola vysadená v polovici 20. storočia za účelom obnovy spustnutých plôch. Referenčnými ekosystémami podľa potenciálnej prirodzenej vegetácii sú v Tematínskych vrchoch xerotermofilné a dubovo-cerové lesy.
- Na lokalite v Tematínskych vrchoch boli rozdiely v záchyte a využití energie cerom a borovicou lesnou iba veľmi málo v prospech porastov borovice, nízky priemerný rozdiel (pod 0,5 %) môže byť spôsobený aj špecifikami stanovíšť, predovšetkým rozdielnou vlhkosťou pôdy.
- Rozdiely medzi účinnosťou záchytu energie v rôznych sukcesných štádiách namerané za jasných dní sa v smere sukcesie na hodnotenej lokalite postupne znižujú. Rozdiely medzi krovinami a stromami sú tu menšie ako rozdiely medzi krovinami a travinnými porastami a tie sú menšie ako rozdiely účinnosti záchytu energie travinným porastom voči odkrytému substrátu. Z grafu je však vidieť, že tak účinnosť disipácie slnečnej energie ako aj jej záchyt a využitie ekosystémom sa zvyšujú smerom ku klimaxu, čo zodpovedá tendencii zvyšovania zložitosti v priebehu sukcesie.

Tabuľka P1. Priemerná účinnosť záchytu a využitia slnečnej energie (– index SEC v %) v lokalite Tematínske vrchy. Výpočet bol realizovaný pre časový interval 10.00 – 14.00 h, podľa bilancie žiarenia a v jednom prípade aj s využitím meraní povrchu ručným teplomerom Raytec (označené RT).

Stanovište a typ porastu (povrchu)	Priemer	Medián	Max	Min	Rozpätie	Odchýlka
T1 borovicový porast 20.8.	79,506	79,484	80,426	78,380	2,046	0,349
T1 borovicový porast 21.8.	80,366	80,401	81,091	79,744	1,347	0,310
T1 priemer borovic. porast 20.-21.8.	79,936	79,943	80,537	79,230	1,306	0,244
T2 cerový porast 22.8.	79,646	79,692	80,379	78,566	1,813	0,339
T2 cerový porast 23.8.	78,984	78,957	79,808	78,259	1,549	0,281
T2 priemer cerový porast 22.-23.8.	79,315	79,332	79,805	78,729	1,076	0,267
T3 borievkové kroviny 20.8.	74,583	74,561	75,190	73,967	1,223	0,286
T4 xerotermný travinný porast 21.8.	67,466	67,583	68,059	66,171	1,888	0,404
T4 xerotermný travinný porast 22.8.	67,783	67,784	68,437	66,900	1,536	0,320

Stanovište a typ porastu (povrchu)	Priemer	Medián	Max	Min	Rozpätie	Odchýlka
T4 xerotermný travinný porast 23.8.	67,734	67,705	68,689	66,782	1,907	0,379
T4 priemer xer. travinný porast 21.-23.8.	67,758	67,774	68,449	66,945	1,503	0,256
T5 odkrytý substrát 22.8.(RT)	56,027	55,062	59,866	54,295	5,571	2,191

Relatívna účinnosť záchytu slnečnej energie

V tabuľke P2 uvádzame priemerné hodnoty indexu relatívnej účinnosti záchytu a využitia energie rôznymi povrchmi na stanovištiach T1 až T5. Tieto hodnoty SEC_{rel} pre ekosystém „i“ vypočítame takto: $SEC_{rel,i} = (SEC_i - MIN(\forall_{j=1,s}\ SEC_j)) / [\ MAX(\forall_{j=1,s}\ SEC_j) - (MIN(\forall_{j=1,s}\ SEC_j)\ ]$, kde s je počet hodnotených ekosystémov. Rozpätie hodnôt sme ohraničili minimálnou a maximálnou vypočítanou hodnotou indexu SEC, ktoré sme zaokrúhlili na najbližšie nižšie resp. vyššie číslo s tromi desatinnými miestami. Hodnoty účinnosti disipácie v danom území sme teda znormovali v rámci rozpätia 54,295 – 81,091 %, čím sme získali index relatívnej účinnosti záchytu a využitia energie (SEC_{rel}), ktorá realistickejšie obrazuje zložitosť, t.j. stupeň organizácie príslušného ekosystému.

Tabuľka P2. Index priemernej relatívnej účinnosti záchytu a využitia slnečnej energie pre povrchy v území Tematínske vrchy. Výpočet bol realizovaný pre časový interval 11.00 – 13.00 h.

Stanovište a typ porastu (povrchu)	Priemer	Medián	Max	Min	Rozpätie	Odchýlka
T1 borovicový porast 20.8.	0,941	0,940	0,975	0,899	0,076	0,013
T1 borovicový porast 21.8.	0,973	0,974	1,000	0,950	0,050	0,012
T1 priemer borov. porast 20.-21.8.	0,957	0,957	0,979	0,931	0,049	0,009
T2 cerový porast 22.8.	0,946	0,948	0,973	0,906	0,068	0,013
T2 cerový porast 23.8.	0,921	0,920	0,952	0,894	0,058	0,010
T2 priemer cerový porast 22.-23.8.	0,934	0,934	0,952	0,912	0,040	0,010
T3 borievkové kroviny 20.8.	0,757	0,756	0,780	0,734	0,046	0,011
T4 xerotermný travinný porast 21.8.	0,492	0,496	0,514	0,443	0,070	0,015
T4 xerotermný travinný porast 22.8.	0,503	0,503	0,528	0,470	0,057	0,012
T4 xerotermný travinný porast 23.8.	0,502	0,500	0,537	0,466	0,071	0,014
T4 priemer xerot. travinný porast 21.-23.8.	0,502	0,503	0,528	0,472	0,056	0,010
T5 odkrytý substrát 22.8. (RT)	0,065	0,029	0,208	0,000	0,208	0,082

Pri porovnaní tabuliek P1 a P2 vidieť, že poradie jednotlivých ekosystémov resp. povrchov ostalo vo vzťahu k ich schopnosti disipácie resp. záchytu a využitia energie zachované, avšak zmenili sa relatívne rozdiely medzi nimi. Index relatívnej účinnosti disipácie energie vychádza pre ihličnatý porast s dominanciou borovice lesnej (*Pinus sylvestris*) v priemere 0,957, pre cerový porast (*Quercus cerris*) v priemere 0,934, kým pre borievkové kroviny (*Juniperus communis*) iba 0,757. Zhruba polovicu relatívnej účinnosti záchytu slnečnej energie dosahuje xerotermná lúka, v priemere 0,502, kým najnižšie hodnoty indexu SEC_{rel} dosahuje odkrytý substrát, iba 0,065.

Tento výsledok umožňuje ilustrovať rozdiel medzi pojmami ekologickej komplexity a integrity. Kým účinnosť záchytu a využitia slnečnej energie (index SEC) reflektuje úroveň ekologickej zložitosti hodnotených ekosystémov, index relatívnej účinnosti disipácie (ovplyvnený hraničnými hodnotami a rozpätím hodnôt v danom území) sa viac blíži k indikácii úrovne ekologickej integrity.

Záchyt a využitie slnečnej energie v závislosti od toku žiarenia

Inou cestou ako zmenšiť šum spôsobený aj malou variabilitou meteorologických podmienok je hodnotiť disipáciu slnečnej energie v závislosti od toku slnečného žiarenia k povrchu ekosystému. (Ďalej je možné ošetriť vzťah medzi účinnosťou disipácie resp. záchytu slnečnej energie a vlhkosťou ovzdušia, rýchlosťou vetra, aj vlhkosťou pôdy. V našom príklade sa obmedzíme na riešenie vzťahu disipácie a záchytu energie k veľkosti toku žiarenia do ekosystému. Priemerné hodnoty indexu SEC pre jednotlivé typy ekosystémov získané spriemerovaním hodnôt v intervale toku žiarenia 450 $W.m^{-2}$ až 800 $W.m^{-2}$ prezentujeme v tabuľke P3.

Tabuľka P3. Priemerná účinnosť záchytu a využitia slnečnej energie (– index SEC v %) v lokalite Tematínske vrchy v závislosti od toku žiarenia. Výpočet bol realizovaný pre interval toku žiarenia 450 – 800 $W.m^{-2}$, ktorý zhruba zopovedá veľkosti toku žiarenia medzi 8.00 a 16.00. Uvádzané hodnoty sú menšie ako v prípade tabuľky 8.1., keďže priemerovaný interval je podstatne dlhší.

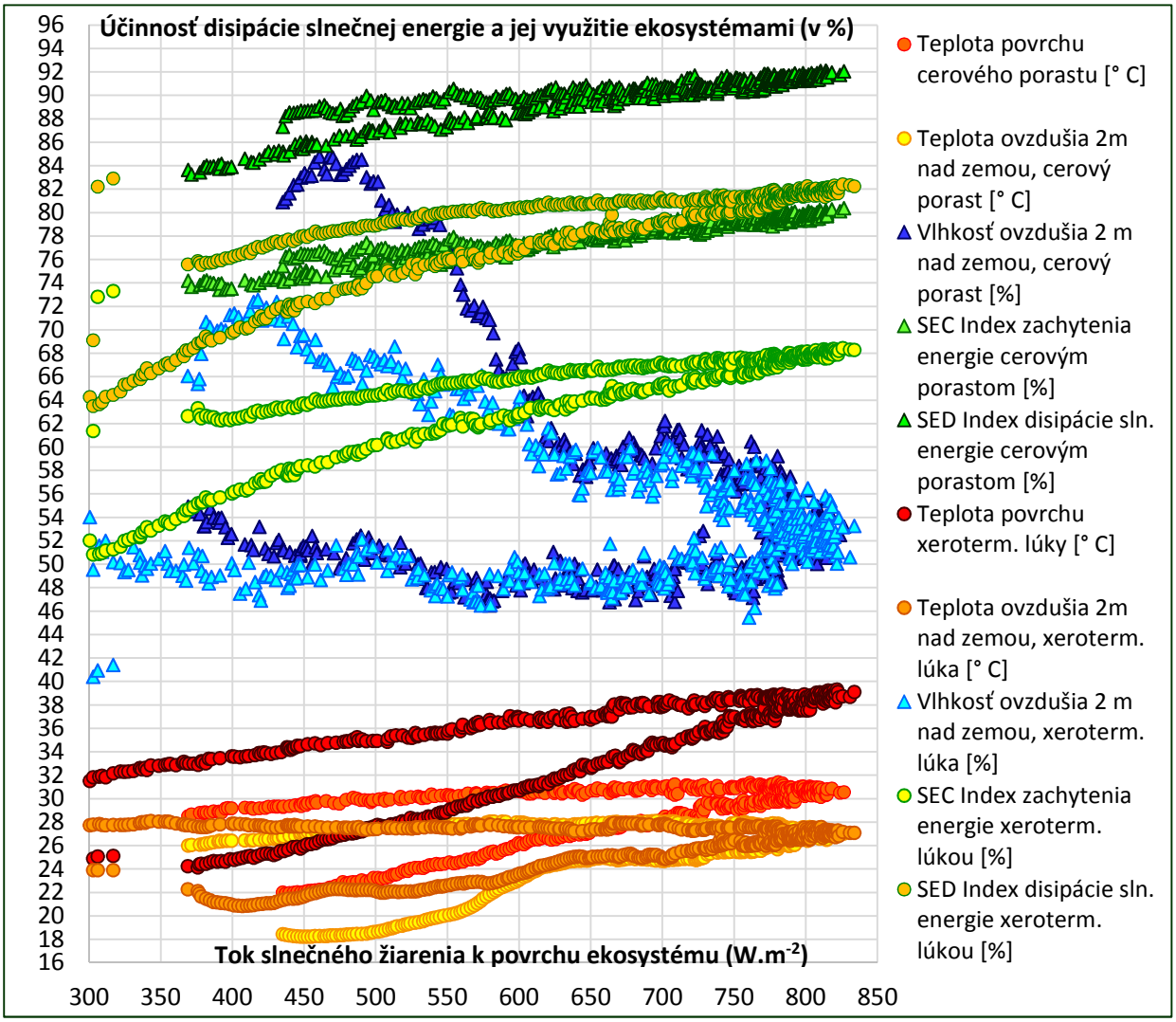
Stanovište a typ porastu (povrchu)	Priemer SEC	Medián SEC	Max SEC	Min SEC	Rozpätie SEC	Priemer. Vstup energie
T1 borovicový porast 20.8.	76,273	76,600	70,724	79,790	9,066	666,964
T1 borovicový porast 21.8.	77,534	78,129	71,936	81,091	9,155	662,110
T1 priemer borovicový porast 20.-21.8.	76,904	77,365	71,330	80,441	9,110	664,537
T2 cerový porast 22.8.	78,142	78,340	74,529	80,104	5,575	666,904
T2 cerový porast 23.8.	78,167	78,623	73,898	80,719	6,821	698,672
T2 priemer cerový porast 22.-23.8.	78,154	78,482	74,213	80,412	6,198	682,788
T3 borievkové kroviny 20.8.	71,342	71,708	66,375	74,390	8,016	653,730
T4 xerotermný travinný porast 21.8.	64,734	65,861	57,046	68,030	10,984	677,896
T4 xerotermný travinný porast 22.8.	65,490	66,132	58,341	68,138	9,798	667,890
T4 xerotermný travinný porast 23.8.	66,033	66,920	57,989	70,436	12,447	684,245
T4 priemer xeroter. travinný 21.-23.8.	65,419	66,305	57,792	68,868	11,076	676,677

V tejto tabuľke sa poradie účinnosti záchytu a využitia slnečnej energie ekosystémami zmenilo v prípade najvyšších sukcesných štádií. V priemere najlepšie zachytáva slnečnú energiu porast duba cerového (*Quercus cerris*), ktorý je v danej lokalite pôvodný. Toto zistenie demonštruje platnosť **ekologického termodynamického zákona** (Jørgensen 2012), podľa ktorého z možných kombinácií druhov systém evolučnými mechanizmami vždy vyberie takú, ktorá umožňuje maximálne využitie v systéme dostupnej energie a ďalších prírodných zdrojov.

Na obr. P7. ilustrujeme **závislosť účinnosti disipácie slnečnej energie a jej využitia**, ako aj povrchovej teploty, teploty ovzdušia a vlhkosti **od intenzity toku žiarenia k ekosystému**. Z ilustrácie vyplýva jedna pozoruhodná skutočnosť: Disipácia slnečnej energie je pri rovnakých hodnotách toku žiarenia na povrch ekosystému vyššia v priebehu dopoludnia, kedy je povrchová teplota ekosystému aj teplota ovzdušia nižšia, kým vlhkosť ovzdušia je vyššia. Disipácia slnečnej energie sa dopoludnia prirodzene zvyšuje s rastom toku žiarenia do ekosystému a po dosiahnutí poludnia (podľa miestneho stredného slnečného času) klesá výraznejšie. Tento trend sme za jasných dní potvrdili počas všetkých meraní a u rôznych typov ekosystémov s vegetáciou. Ponúkajú sa dve vysvetlenia:

Konvenčné vysvetlenie podľa učebníc biológie (napr. STARR et al. 2013) vychádza z toho, že rastliny popoludní pri väčšej horúčave viac zatvárajú prieduchy, aby sa chránili pred nadmernými stratami vody

transpiráciou. To však celkom neodpovedá na otázku, prečo rastliny začínajú výraznejšie znižovať disipáciu slnečnej energie práve v čase, kedy je zreteľný trend poklesu toku slnečného žiarenia do ekosystému. Ak zoberieme do úvahy **štúdie venované otázkam inteligencie rastlín** (napr. TREWAVAS 2014, 2016), potom sa ponúka aj nekonvenčná hypotéza. Rastliny akoby vyhodnocovali trendy zmien toku žiarenia a zohrievania povrchu a ak sa tieto trendy zmenia, prispôsobia im svoje správanie. Nesvedčí však už vyhodnocovanie trendov (a teda očakávaní budúcnosti) aj o istom stupni inteligencie?



Obr. P7. Porovnanie účinnosti disipácie slnečnej energie a účinnosti zachytenia a využitia slnečnej energie (a ďalších premenných) v závislosti od toku žiarenia pre dva typy ekosystémov na úpätí Tematínskych vrchov dňa 22. augusta 2010. *Graf a údaje:* Peter Sabo, 2019.

Napriek tomu, že niektorí autori považujú schopnosť disipácie slnečnej energie za celostný ukazovateľ zložitosti ekosystému aj jeho integrity (napr. KAY et al. 2001) my ho vnímame iba ako jeden z parciálnych indikátorov. Pretože napr. park s prevahou drevín môže mať celkom vysoké indexy disipácie SED resp. záchytu energie SEC a pritom v dôsledku prevahy nepôvodných druhov vôbec nemusí mať vysokú integritu. Preto sme naše experimenty dopĺňali aj hodnotením diverzity a kompozície.

P2.3 Indikátory horizontálnej štrukturálnej zložky zložitosti a integrity

Na rozlíšenie úrovne ekologickej integrity potrebujeme aj ďalší **ukazovateľ týkajúci sa horizontálnej štruktúry a kompozície ekosystému**. V tejto časti prezentujeme výpočet ďalších parciálnych indexov ekologickej zložitosti a integrity hodnotených ekosystémov na úpätí Tematínskych vrchov.

Tieto indexy považujeme za doplňujúce k indexom absolútnej a relatívnej účinnosti disipácie alebo záchytu slnečnej energie ekosystémom. Vypočítali sme ich s využitím indexov druhovej diverzity cievnatých rastlín na jednotlivých stanovištiach a tiež s využitím pôvodných indexov hemeróbie a naopak, pôvodnosti vegetácie, ktoré sme získali kvantifikáciou abundancie cudzích, osobitne aj inváznych a tiež pôvodných taxónov.

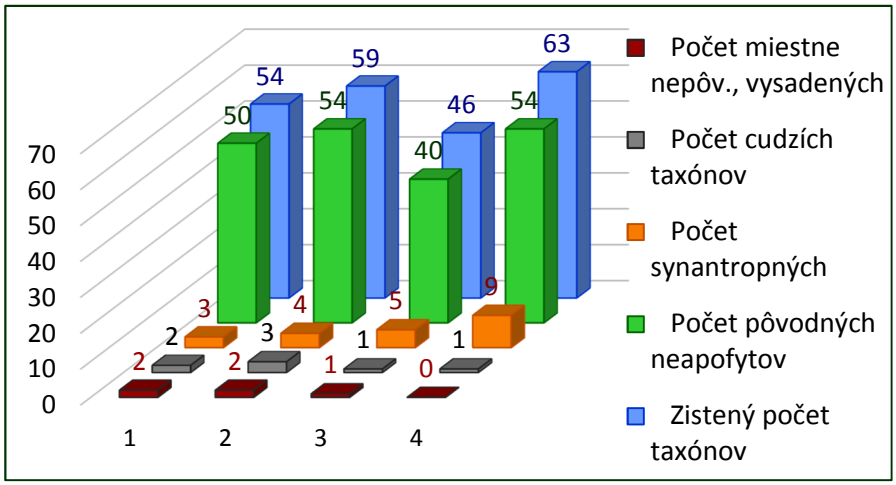
Súčasná vegetácia na hodnotených stanovištiach na úpätí Tematínskych vrchov

Celkove sme v hodnotenom území **determinovali 106 taxónov, z toho 19 druhov drevín**. V stromovej etáži dominujú pred desaťročiami na spustnutých plochách vysadené a zmladzujúce borovica lesná (*Pinus sylvestris*) a b. čierna (*P. nigra),* v zmiešanom poraste dub cerový (*Quercus cerris*), s prímesou javora horského (*Acer pseudoplatanus)* a ďalších listnáčov na oboch stanovištiach T1 a T2. Z krovín sú tu najmä dráč obyčajný (*Berberis vulgaris*) a borievka obyčajná (*Juniperus communis*), ale tiež lieska obyčajná (*Corylus avellana*), zob vtáčí (*Ligustrum vulgare*), ruža šípová (*Rosa canina*), hloh jednosemenný (*Crataegus monogyna*) a ďalšie druhy.

Bylinnú etáž charakterizuje výskyt xerotermných druhov, ktoré rastú najmä v xerotermnom travinnom poraste, avšak aj na sukcesne vyšších stanovištiach, vrátane okrajov dubovo-cerových lesov, ktoré sú v danej lokalite rozvoľnené a pretkané čistinkami. Z teplomilných druhov sa na viacerých stanovištiach vyskytuje napr. tarica horská (*Alyssum montanum*), marinka psia (*Asperula cynanchica*), ďatelinovec päťlistý (*Dorycnium pentaphyllum*), devätorník peniažtekový (*Helianthemum nummularium* agg.), hlaváč žltkastý (*Scabiosa ochroleuca*), hrdobarka obyčajná (*Teucrium chamaedrys*) a ďalšie.

Z druhov so širokou ekologickou amplitúdou tu rastie napr. rebríček obyčajný (*Achillea millefolium* agg.), jahoda trávnicová (*Fragaria viridis*), lipkavec mäkký (*Galium mollugo*), ľadenec rožkatý (*Lotus corniculatus),* bedrovník lomikameňový (*Pimpinella saxifraga*). K atraktívnejším trávam v xerotermnom travinnom poraste patria mednička brvitá (*Melica ciliata*) a kavyľ vláskovitý (*Stipa capillata*), dominantná je tu fúzatka prstnatá (*Botriochloa ischaeum*) a hojnejšia je aj ostrica nízka (*Carex humilis*), z **atraktívnych bylín** oko okoloidúceho turistu môže upútať napr. oman mečolistý (*Inula ensifolia*), nevädzka porýnska (*Acosta rhenana*), horčičník voňavý (*Erysimum odoratum*), gulička bodkovaná (*Globularia punctata*) či sezel sivý (*Seseli osseum*), ako aj dva druhy klinčekov (*Dianthus* spp.).

Na obr. P8 ilustrujeme zastúpenie rôznych skupín taxónov na daných stanovištiach – **vysadených,** miestne nepôvodných druhov (v území ide o dávne výsadby borovice čiernej a borovice lesnej za účelom obnovy vegetácie na spustnutých a zerodovaných pôdach), ďalej **cudzích** (nepôvodných), **synantropných aj pôvodných a súčasne nesynantropných druhov** (tzv. neapofytov). Z ilustrácie vidieť, že počet pôvodných neapofytov je najvyšší v cerovom lese a na xerotermnej lúke. Tento počet však ešte nič nehovorí o skutočnom zastúpení jednotlivých skupín (ilustrovanom na obr. P11), pretože naopak, abundancia cudzích a synantropných druhov je na xerotermnej lúke veľmi nízka.



Obr. P8. Porovnanie počtov taxónov na jednotlivých stanovištiach v hodnotenom území na úpätí Tematínskych vrchov. Relatívne vysoké sú počty pôvodných taxónov, synantropných druhov je oproti nim menej, rastú najmä na lúke a v krovinách.
Graf: © Peter Sabo, *údaje:* Peter Sabo, Ingrid Turisová, František Bača.

(Poznámka: oproti štúdii SABO et al. 2017 je tu prezentovaný počet synantropných druhov nižší a naopak počet pôvodných nesynantropných taxónov, tzv. neapofytov, vyšší, čo je spôsobené úpravou metodiky aj striktnejšou klasifikáciou synantropných druhov oproti štúdii JURKO 1990. Rovnaký dôsledok sa týka údajov o podiele zastúpenia jednotlivých skupín druhov – graf na obr. P11.)

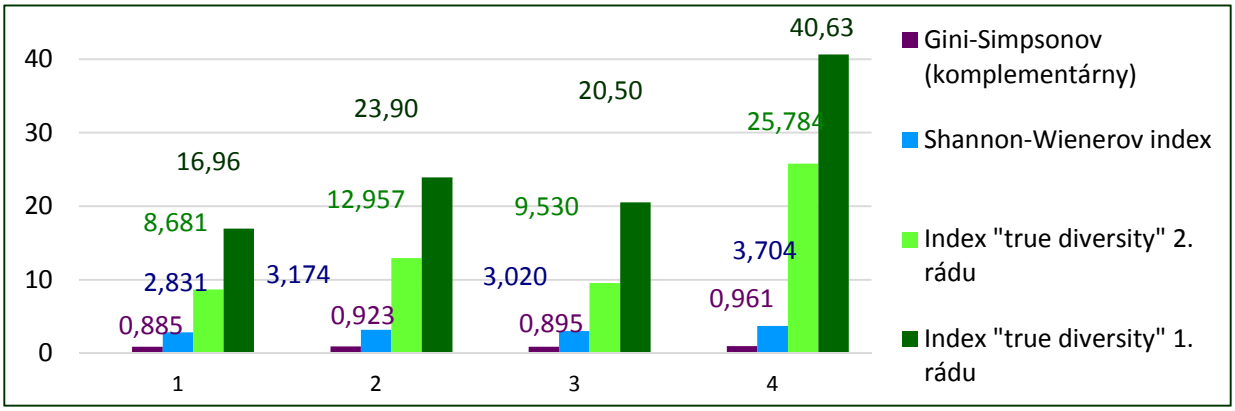
Obr. P9. Typické druhy vápencových kamenistých a trávnatých svahov, aj vzácnejšie druhy z hodnotenej lokality. a) tarica kopcová (*Alyssum montanum*), b) prilbovka červená (*Cephalanthera rubra*), c) kruštík tmavočervený (*Epipactis atrorubens*), d) klinček včasný Lumnitzerov (*Dianthus praecox* subsp. *lumnitzeri*). *Foto a):* © František Bača 1996, *foto b, c, d):* Peter Sabo, b,c: 2011, d: 2020.

Z potenciálne resp. takmer ohrozených druhov zapísaných **v červenom zozname** (v kategórii NT) sa v hodnotenej lokalite vyskytujú klinček včasný Lumnitzerov (*Dianthus praecox* subsp. *lumnitzeri*) a

silenka uškatá (*Silene otites*, NT), z orchideí iba vzácne prilbovka červená (*Cephalanthera rubra*, NT). Z ďalších druhov zapísaných v červenom zozname tu hojnejšie rastie kruštík tmavočervený (*Epipactis atrorubens*, LC, najmenej dotknutý druh). Matransko-predkarpatským endemitom je klinček včasný Lumnitzerov (*Dianthus praecox* subsp. *lumnitzeri*) a subendemitom Karpát je tu dvojštítok hladkoplodý rakúsky (*Biscutella laevigata* subsp. *austriaca*) (KLIMENT 1999; ELIÁŠ et al. 2015). (Obr. P9)

Indexy druhovej diverzity ako indikátory kompozície ekologického systému

Druhová diverzita indikuje horizontálnu štrukturálnu ekologickú zložitosť spoločenstiev. Nami získané výsledky výpočtov indexov druhovej diverzi ty cievnatých rastlín vychádzajú z fytocenologických zápisov na každom stanovišti a ich prevodu do numerickej formy podľa van der MAALERA (2007), pričom sme zvolili jeho strmší variant klasifikácie abundancie vyšších rastlín. Grafické spracovanie uvádzame na obr. P10.



Obr. P10. Indexy druhovej diverzity pre hodnotené stanovištia na úpätí Tematínskych vrchov (mimo územia európskeho významu). Zreteľná je rozdielna diskriminačná sila použitých indexov.
Graf: © Peter Sabo, 2016, *údaje:* Peter Sabo, Ingrid Turisová, František Bača.

Táto diverzita je najvyššia na stanovišti T4, xerotermná lúka, a najnižšia v zmiešanom, prevažne borovicovom poraste. Z ilustrácie je zrejmá výhodnosť využívania Hillových čísel, resp. pravdivých indexov diverzity, ktorých rozlišovacia schopnosť je vyššia ako v prípade najčastejšie používaného Shannon-Wienerovho indexu. Ilustruje to aj index pravdivej diverzity druhého rádu pre jednotlivé stanovištia“ ${}^2D_{T1} = 16{,}959$, ${}^2D_{T2} = 23{,}903$, ${}^2D_{T3} = 20{,}500$ a ${}^2D_{T4} = 40{,}628$. Podobne výrazné, aj keď nižšie rozdiely vyjadríme aj pomocou indexu pravdivej diverzity prvého rádu.

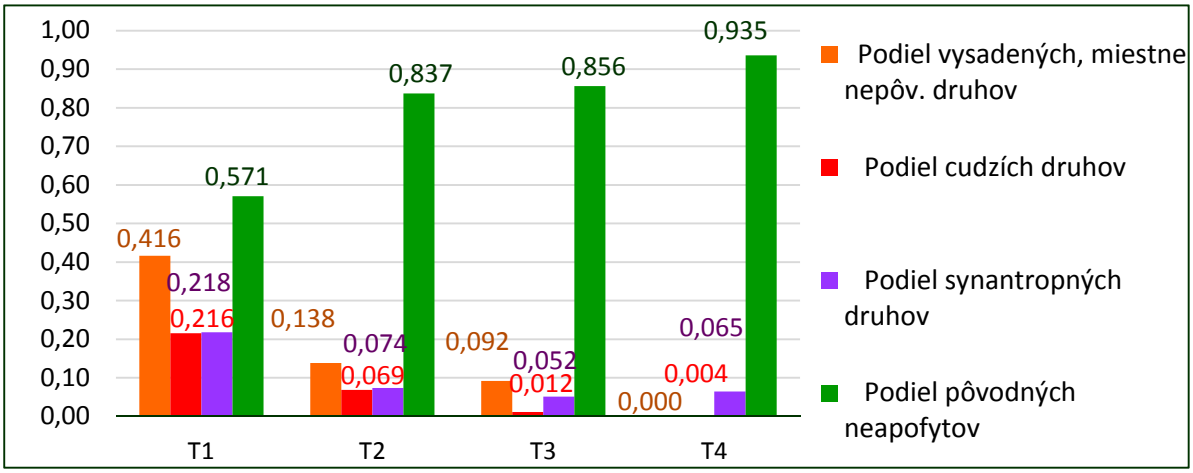
Z ilustrácie vidieť, že funkčná zložka ekologickej komplexity nemusí vždy korešpondovať so štrukturálnou zložkou. Napr. v našom prípade majú najvyššiu kapacitu pre disipáciu slnečnej energie lesné porasty T1 a T2 (resp. ich hodnotené okraje) a naopak, najnižšiu kapacitu pre disipáciu slnečnej energie má xerotermná lúka T4. Táto lúka má najvyššiu druhovú diverzitu v rámci hodnotených stanovíšť, kým najnižšiu diverzitu má zmiešaný, prevažne borovicový porast.

Od hemeróbie vegetácie k indikácii ekologickej integrity

Ako sme už uviedli vyššie, podstatou hodnotenia ekologickej integrity (EI) je určenie „ekologickej vzdialenosti“ k normatívu prírodnej krajiny (divočiny), ktorú môžeme opäť rozčleniť do funkčnej, štrukturálnej a časovej dimenzie. Pri hodnotení štrukturálnej zložky EI (podobne ako pri hodnotení štrukturálnej ekologickej komplexity) vychádzame z fytocenologických zápisov na jednotlivých stanovištiach, pričom sa zameriame na hodnotenie podielu cudzích, nepôvodných, synantropných, ale aj pôvodných druhov (*native species*).

S rastom podielu cudzích a synantropných druhov sa vzdialenosť hodnoteného ekosystému k referenčnému prírodnému normatívu zvyšuje, čo indikuje nižšiu ekologickú integritu, kým naopak, rast

zastúpenia pôvodných druhov indikuje vyššiu horizontálnu zložku ekologickej integrity. Výsledky zisťovania pôvodnosti a naopak cudzosti a synantropizácie vegetácie prezentujeme na obr. P11.



Obr. P11. Podiely zastúpenia vysadených (miestne nepôvodných druhov, v tomto prípade *Pinus nigra* a *Pinus sylvestris*), **cudzích (nepôvodných) a synantropných druhov, ako aj podiel zastúpenia pôvodných neapofytov** (pôvodne druhov divočiny).
Graf: © Peter Sabo, 2019, *údaje:* Peter Sabo, Ingrid Turisová, František Bača.

Vhodným ukazovateľom narušenia spoločenstva vo forme synantropizácie, inváznosti alebo výsadby cudzích druhov je podiel vysadených, inváznych a synantropných druhov v porastoch. Najvyšší podiel v území nepôvodných vysadených taxónov bol v zmiešanom, prevažne borovicovom poraste (VYS_{T1} = 0,416), išlo o borovicu čiernu (*Pinus nigra*) a b. lesnú (*P. sylvestris*). Logicky vysoké bolo na tomto stanovišti aj zastúpenie cudzích a synantropných druhov (najmä vysadenej borovice čiernej) ALI_{T1} = 0,216, SYN_{T1} = 0,218 a nízke bolo zastúpenie pôvodných neapofytov NAT_{T1} = 0,571.

S výnimkou stanovišťa T1 je zastúpenie pôvodných a súčasne nesynantropných druhov, t.j. pôvodných neapofytov pomerne vysoké, najvyššie je na xerotermnej lúke (NAT_{T4} = 0,935), trochu menej v ekotónovom leme s dominujúcou borievkou (NAT_{T3} = 0,856) a v cerovom poraste (NAT_{T2} = 0,837). Zo vzácnejších druhov je tu najvýznamnejší je matransko-predkarpatský paleoendemit klinček včasný Lumnitzerov (*Dianthus praecox* subsp. *lumnitzeri*). (Tu treba uviesť, že zápis zachytáva aj časť xerotermnej lúky, na ktorej borievka rastie a na druhej strane aj časť porastu borovice lesnej, stanovište má teda skôr ekotónový charakter, aj keď sme po borievkami zaznamenali menej druhov.)

V tabuľke P4 prezentujeme indexy diverzity, nepôvodnosti, synantropizácie a pôvodnosti neapofytov (pôvodných taxónoc divočiny) chápané ako podiely zastúpenia príslušných druhov. Tieto parciálne indexy nám indikujú horizontálne štrukturálne zložky ekologickej zložitosti a ekologickej integrity.

Tabuľka P4. Parciálne indexy štrukturálnej zložky ekologickej zložitosti a integrity

Stanovište	T1 zmiešaný porast	T2 zväčša cerový les	T3 borievka na lúke	T4 xerotermná lúka
Shannon-Wienerov index	2,831	3,174	3,020	3,704
Index pravdivej diverzity 1. rádu	16,959	23,903	20,500	40,628
Index pravdivej diverzity 2. rádu	8,681	12,957	9,530	25,784
Index cudzosti (nepôvodnosti)	0,216	0,069	0,012	0,004
Index synantropizácie	0,218	0,074	0,052	0,065
Index pôvodných neapofytov	0,571	0,837	0,856	0,935

Je zrejmé, že integrita ekosystému znamená predovšetkým zachovanie pôvodnej fyzickej štruktúry a pôvodných interakcií medzi prvkami systému. V ekosystéme a v krajine je preto potrebné v čo najvyššej miere zachovať pôvodné druhy (*native species*), ktoré sú predpokladom prirodzenej dynamiky aj homeostázy, schopností regenerácie a adaptability každého prírodného aj poloprírodného systému.

P3 Niektoré poznámky k hodnoteniu ekologickej zložitosti a integrity

Cieľom našich experimentov bolo rozvinúť koncepcie ekologickej zložitosti a ekologickej integrity a overiť ich praktické uplatnenie pri hodnotení ekosystémov. Napriek do hĺbky rozpracovanej teórii totiž za ňou stále výrazne zaostáva práve jej praktické uplatnenie. Vychádzali sme z dimenzií zložitosti podľa CADENASSO et al. (2006) a z hodnotenia ekologickej integrity podľa WURTZEBACHA & SCHULTZA (2016), ktoré sme adaptovali za účelom ich praktického využitia na hodnotenie funkčného a kompozične-štrukturálneho rozmeru ekologickej zložitosti a ekologickej integrity.

Disipácia slnečnej energie v kontexte zmeny klímy

Synergia pôsobenia slnečného žiarenia, vegetácie a vlhkosti je predpokladom početných ekosystémových služieb v krajine (HESSLEROVÁ & POKORNÝ 2009). Zmeny disipácie slnečnej energie v dôsledku zmien krajinnej pokrývky majú závažné dôsledky, pretože sa tým znižuje ochladzujúci efekt, ktorý je zreteľný v nižších zemepisných šírkach a v lete aj v miernom pásme. Odlesňovanie a úbytok vodných plôch a mokradí sa preto premieta až do regionálnych zmien klímy a posilňuje globálnu zmenu klímy (BROM & POKORNÝ 2009; POKORNÝ et al. 2002, 2010). Ochladzujúci efekt vegetácie je pritom rozdielny, mení sa v závislosti od typu vegetácie (LIM et al. 2008). Z tohto dôvodu je pri adaptácii na zmenu klímy zásadné udržať alebo obnoviť primeranú štruktúru krajiny s dostatkom lesov, vodných plôch a mokradí. Štúdie zamerané na lesy potvrdzujú, že tieto majú vyššiu schopnosť disipácie slnečnej energie, v dôsledku veľkého objemu biomasy a sú rezilientnejšie voči otepľovaniu ich povrchu, celkovo brzdia klimatickú zmenu (napr. LIN et al. 2017; ELLISON et al. 2017).

Podľa nami získaných výsledkov sa ochladzujúci efekt vegetácie (v porovnaní s odkrytým substrátom alebo umelými povrchmi, ako je napr. asfaltová cesta, SABO & ŠKODOVÁ 2016) zvyšuje smerom k vyšším sukcesným štádiám, čo je v súlade s teóriou nerovnovážnej termodynamiky a výsledkami iných štúdií, napr. AERTS et al. (2004), LIN et al. (2009, 2011), KIM et al. (2002). Podľa našich výsledkov sa však ochladzujúci efekt netýka iba lesov, aj keď v ich prípade je najvyšší. Krajinu ochladzuje aj disipácia slnečnej energie krovinami, trvalými trávnymi porastami, mokraďami, vodnými tokmi a vodnými plochami. To je plne v súlade so zisteniami POKORNÉHO et al. (2010) a EISELTOVEJ et al. (2012), ktorí poukázali na kľúčový význam evapotranspirácie pre udržateľný manažment krajiny práve v dobe globálnej zmeny klímy. Rozsiahle zvyšovanie zástavby, odstraňovanie vegetácie a vysúšanie krajiny (vrátane mokradí) preto nevyhnutne vedie k zníženiu kapacity ekosystémov a krajín disipovať slnečnú energiu a tým k prehrievaniu krajiny v letnom období (TESAŘ et al. 2007).

V prípade hodnotenia funkčnej zložky ekologickej integrity je potrebné hodnotiť aj disipáciu slnečnej energie a jej vzdialenosť od referenčného ekosystému. V prípade našej štúdie z úpätia Tematínskych vrchov ním bol porast duba cerového, nakoľko však disipácia energie zmiešaným ihličnato-listnatým porastom s prevahou borovíc bola vyššia, použili sme tento porast ako referenčný systém pre disipáciu (nie pre druhovú skladbu).

V našej štúdii sme použili metódu snímania porastu na južnom okraji lesa, ktorý je v priebehu dňa neustále oslnený. Dnešné technické možnosti však umožňujú využiť aj vyhotovenie termálnych snímkov termokamerou, ktorá sníma územie z nízko letiaceho lietadla, čo využili napr. LUVALL & HOLBO (1989) a QUATTROCHI & LUVALL (1999). KIM et al. (2016) využili termosnímky na výpočet teploty povrchu lesného ekosystému, v ktorom dominovala vždy zelená borovica ťažká (*Pinus ponderosa*). V strednej Európe využívajú termovíziu na meranie povrchovej teploty ekosystémov napr. POKORNÝ et al. (2010).

Jednoduché hodnotenie horizontálnej štrukturálnej zložitosti a kompozície ekosystému

Viaceré prístupy (napr. WOODLEY 2010) sa zhodujú v tom, že k ukazovateľom integrity ekosystému patrí druhová diverzita aj druhová skladba ekosystému, čo je v súlade aj s ďalším pilierom nášho modelu zložitosti a integrity. Horizontálnu zložku štrukturálnej zložitosti ekosystému dobre vyjadrujú indexy druhovej alebo krajinnej diverzity. Čo sa týka samotnej metriky druhovej diverzity, napriek konsenzu o jej význame zatiaľ chýbajú štandardizované postupy, predovšetkým týkajúce sa monitoringu biodiverzity za účelom ochrany prírody a manažmentu ekosystémov (CHIARUCCI et al. 2011). Preto sme za účelom porovnania, použili viaceré indexy, nielen klasický Shannon-Winerov index, ale aj Hillove čísla (JOST 2006), nazývané aj pravdivé indexy diverzity (TUOMISTO 2011). Získané výsledky demonštrujú, že tieto „pravdivé indexy" majú väčšiu diskriminačnú silu, preto sú vhodnejšie pre porovnávanie rôznych spoločenstiev a ekosytsémov.

Hodnotenie druhovej diverzity ako indikátora štrukturálnej zložitosti a integrity ekosystému však nestačí, napr. WRZESIEŃ et al. (2016) preukázali, že dokonca aj flóra vo vnútorných urbánnych železničných oblastiach Lublinu v Poľsku a Ľvova na Ukrajine je druhovo veľmi pestrá, ale s vysokým zastúpením inváznych druhov. Preto je potrebné doplniť ho aj o hodnotenie zmien druhovej skladby vo vzťahu k referenčnému ekosystému.

Koncepcia hemeróbie sa už využíva na hodnotenie antropogénnych zmien rastlinných spoločenstiev (napr. JACKOWIAK 1998; KIEDRZYŃSKI et al. 2014). Čo sa týka indexov hemeróbie (a naopak indexov kvality vegetácie), ich kvantifikácia odráža rôznosť prístupov, aj to, že indexy zatiaľ nie sú štandardizované. Napr. CIECIERSKA & KOLADA (2014) vytvorili syntetický index reflektujúci druhové zloženie a vyrovnanosť spoločenstva makrofytov v litorálnej zóne ako základ odhadu ekologického stavu jazier. Avšak kvalitu porastu makrofytov nereflektuje iba nimi použitá analýza zložitosti a kompozície litorálnej vegetácie rôznymi spoločenstvami. Výskyt synantropných druhov uvažujú aj SERAFIN & POGORLEZEC (2011), avšak ich výpočet redukuje hodnotenie synatropizácie vegetácie na synantropizáciu flóry.

Definícia referenčného ekosystému ostáva otvorenou otázkou tak pri hodnotení disipácie slnečnej energie ako aj pri indikácii horizontálnej štruktúry a kompozície. Napr. pri hodnotení integrity xerotermnej lúky jej integrita vyšla výrazne nižšia oproti okraju cerového lesa určenému podľa mapy potenciálnej prírodnej vegetácie (oproti ekotónovému krovinnému porastu), pritom však ide o druhovo bohatý a pomerne cenný travinný porast. V budúcnosti bude preto správnejšie brať do úvahy aj referenčné travinné ekosystémy, krovinné ekosystémy a pod. Vhodným základom pre zisťovanie prítomnosti charakteristických druhov môže byť Katalóg biotopov Slovenska (STANOVÁ & VALACHOVIČ 2002), ako aj katalóg európsky významných biotopov na Slovensku (VICENÍKOVÁ & POLÁK 2003).

Zhrnutie Prílohy

Použité metódy hodnotenia ekologickej komplexity a ekologickej integrity

- Pri hodnotení ekologickej komplexity a integrity ekosystémov **sme postupovali v troch krokoch**: 1) Indikácia funkčnej zložitosti na báze hodnotenia záchytu a disipácie slnečnej energie systémom, plus odhad relatívnej ekologickej vzdialenosti hodnoteného ekosystému k prírodnému vzoru. 2) Indikácia horizontálnej štrukturálnej zložitosti ekosystémov, na báze hodnotenia druhovej diverzity cievnatých rastlín. 3) Hodnotenie kompozície ako indikátora ekologickej integruity nepriamo cez hemeróbiu vegetácie, nepriaznivú zmenu druhového zloženia rastlinných spoločenstiev.
- **Kapacita ekosystému disipovať energiu je dobrým indikátorom jeho zložitosti**. Mnohí ju považujú za celostný indikátor, my to vnímame skôr ako indikátor zložky funkčnej zložitosti. Index účinnosti disipácie slnečnej energie SED vychádza z veľkosti čistého toku energie transformovanej ekosystémom na energiu nižšej kvality, ktorá je vztiahnutá k reálnemu toku prijatého žiarenia. Podobný indikátor SEC vyjadruje kapacitu ekosystému zachytávať a využiť slnečnú energiu, čistý tok energie do ekosystému je tu vztiahnutý k toku slnečného žiarenia, ktorý smeruje k povrchu ekosystému.
- Nepriamu indikáciu kapacity ekosystému disipovať slnečnú energiu umožňujú **teplotné indikátory.** Indikátor teplotnej pufračnej kapacity ekosystému – index TBC vyjadruje účinnosť homeostatického

mechanizmu, ktorým sa ekosystém vyrovnáva s prísunom energie a zabraňuje svojmu prehriatiu. Vyjadruje termálnu inertnosť ekosystému voči prísunu energie. Indikátor teplotnej odozvy ekosystému – index TRN vyjadruje množstvo ekosystémom zachytenej energie slnečného žiarenia, potrebné na zmenu teploty povrchu o jednotku teploty.

- Štrukturálnu zložitosť druhového zloženia vegetácie sme pre každý fytocenologický zápis hodnotili prostredníctvom viacerých indexov diverzity, a to štandardne využívaných – Simpsonovho indexu a Shannonovho indexu, aj novšie odporúčaných – Hillových čísel, nazývaných aj „indexy pravdivej diverzity“ alebo „pravdivé indexy diverzity“.
- Pre hodnotenie hemeróbie vegetácie ako nepriamej miery ekologickej integrity sme vytvorili pôvodné indexy cudzosti, synantropizácie a prírodnosti (pôvodnosti) druhového zloženia. Spravidla sa v nich vždy uplatňuje viac kategórií, napr. v prípade cudzích druhov rastlín (*alien species*) – invázne taxóny, nepôvodné archeofyty a nepôvodné neofyty. Pri ich využívaní sme preto vo vytvorených vzorcoch uplatnili rôzne váhy, ktoré reflektujú ich rozdielny význam. Analogicky sme zisťovali aj pôvodnosť vegetácie na báze abundancie pôvodných taxónov cievnatých rastlín.
- V rokoch 2009 až 2016 sme sa preto venovali možnostiam praktického hodnotenia dvoch skupín čiastkových indikátorov zložitosti a integrity ekosystémov v oblasti Piešťan a v alúviu Váhu, na úpätí Tematínskych vrchov v Považskom Inovci, pod oblasťou Podlavických výmoľov pri Banskej Bystrici, komplexov polí, lúk a krovín v chotári obce Jasenie pod Nízkymi Tatrami a komplexu lúk, mokradí, krovín a lesného ekotónu nad osadou Štefanová v Krivánskej Malej Fatre.
- Z dôležitej prípadovej štúdie realizovanej na úpätí Tematínskych vrchov za ideálneho počasia (viacdňovej anticyklonály) vyplýva, že pri povrchu pokrytom vegetáciou sa účinnosť disipácie slnečnej energie zreteľne zvyšuje smerom k vyšším sukcesným štádiám, najnižšia bola zistená pre xerotermný travinný porast. Vyššiu vykazuje ekotón borievkových krovín a najvyššiu okraje lesných porastov (zmiešaný porast s dominujúcou borovicou lesnou a prevažne listnatý porast s dominanciou duba cerového).
- Pri hodnotení ekosystémov počas po sebe nasledujúcich dní boli rozdiely hodnôt vztiahnutých k tým istým povrchom minimálne (cca 0,5 – 1 %, výnimočne 2 %). Tieto rozdiely závisia od zmien toku žiarenia, vlhkosti pôdy, teploty a vlhkosti ovzdušia, rýchlosti a smeru vetra. Za podmienky, že dané dni sa minimálne odlišujú veľkosťami týchto veličín, môžeme jednotlivé merania porovnávať. Cestou ako zmenšiť malý šum spôsobený aj malou variabilitou meteorologických podmienok je hodnotiť disipáciu slnečnej energie v závislosti od toku slnečného žiarenia k povrchu ekosystému.
- Znormovaním vypočítaných indexov SED a SEC vo vzťahu k intervalu medzi najvyššími a najnižšími hodnotami týchto indexov dostávame indexy relatívnej účinnosti disipácie SED_{relat} resp. relatívneho záchytu slnečnej energie SEC_{relat}. Kým indexy SED a SEC plne postačujú na indikáciu úrovne ekologickej zložitosti (v %), indexy SED_{relat} a SEC_{relat} sa skôr blížia k indikácii úrovne ekologickej integrity.
- Z priebehu disipácie slnečnej energie vo vzťahu k toku žiarenia vyplýva aj pozoruhodná skutočnosť: Disipácia slnečnej energie aj jej využitie sú vyššie v priebehu slnečného dopoludnia, kedy je povrchová teplota ekosystému aj teplota ovzdušia nižšia, kým vlhkosť ovzdušia je vyššia. Popoludní, pri vyšších teplotách povrchu aj ovzdušia a pri nižšej vlhkosti rastliny čiastočne zatvárajú prieduchy, aby sa chránili pred nadmernými stratami vody, teplota povrchu už nestúpa tak prudko ako dopoludnia, transpirácia vody rastlinou je nižšia. Ďalšie vysvetlenie ponúka teória o inteligencii rastlín.
- Získané výsledky z experimentu prezentovaného v podkapitole 7.3 demonštrujú, že funkčná zložka ekologickej komplexity nie vždy korešponduje so štrukturálnou zložkou. Napr. v našom prípade mali najvyššiu kapacitu pre disipáciu slnečnej energie okraje lesných porastov T1 a T2 a naopak, najnižšiu kapacitu pre disipáciu slnečnej energie mala xerotermná lúka T4. Táto lúka však mala najvyššiu druhovú diverzitu v rámci hodnotených stanovíšť, kým najnižšiu diverzitu mal zmiešaný, prevažne borovicový porast. Tento porast mal aj najnižšie zastúpenie pôvodných druhov, jeho parciálny index ekologickej integrity bol nízky.

DOSLOV

Predložená publikácia predstavuje úvod do problematiky systémovej ekológie, ktorý sme úmyselne poňali netradične širšie. Zasadili sme ho do kontextu súčasnej globálnej krízy, s dôrazom na jej environmentálny rozmer, priblíženie jej hybných síl a hľadanie udržateľných spôsobov našej existencie.

Prírodné zdroje, život udržujúce procesy a ekosystémové služby vždy v ľudskej histórii boli a aj dnes sú ekologickým pilierom existencie, prosperity a kvality života ľudí. Súčasný rozsah a tempo ich čerpania, produkcie odpadov a narúšania ekosystémov znižujú ich kapacitu podporovať ľudskú spoločnosť. Rastú počty vedeckých publikácií a správ svetových organizácií, ktoré opisujú rôznorodé globálne problémy a ich následky. K hlavným výzvam patrí najmä úbytok biodiverzity, klimatická zmena, narušenie biogeochemických cyklov, znečisťovanie prostredia, výrazná premena krajinnej pokrývky a ďalšie.

Vnímanie týchto procesov a rozhodujúceho podielu človeka vedie k úvahám o možnom kolapse našej civilizácie už v priebehu niekoľkých desaťročí, ak budeme pokračovať v rastúcej entropizácii planéty. Problémom je nielen klimatická zmena, ale aj rozsiahla likvidácia, fragmentácia a degradácia prírodných biotopov, vyčerpávanie vodných zdrojov, rozsiahle znečisťovanie prostredia (širokým spektrom látok), aj nové riziká, k akým patrí rozvíjajúca sa syntetická biológia, umelá inteligencia, robotické zbrane a pod.

Vnímanie faktu, že už štyri desaťročia naša spoločná globálna ekologická stopa výrazne prevyšuje dostupnú biologickú kapacitu planéty, čím vytvárame gigantický ekologický dlh, vedie nielen k fenoménu environmentálneho žiaľu, ale je aj živnou pôdou apokalyptických predpovedí o zániku ľudstva. V tejto situácii rastie dopyt verejnosti aj politikov po jednoduchých lineárnych riešeniach. Ak im však podľahneme (napr. ak budeme naďalej vyrábať bionaftu z palmového oleja na úkor tropických pralesov, produkovať elektrinu spaľovaním životodarných stromov z lesov, z brehov vodných tokov a pod. alebo ak zastaviame každú riečku malými vodnými elektrárňami), v skutočnosti nič nevyriešime, ale problémy iba zhoršíme.

Súčasťou širokého spektra hybných síl súčasnej krízy a súčasne aj hybných síl skratkovitých a často až skratových riešení (napr. plány megafabriky pre elektromobily pri Berlíne na úkor obrovskej rozlohy lesa) je totiž aj nedostatočné vnímanie a rešpektovanie vysokej zložitosti organizmov a ekologických systémov, nesmierne zložitého pradiva vzťahov, ktorého sme súčasťou. Práve v tomto kontexte vzrastá význam systémovej ekológie a s ňou spojených koncepcií, ktoré na túto zložitosť poukazujú. K prekonaniu tejto závažnej medzery v poznávaní nášho sveta sme sa preto snažili prispieť aj predloženou publikáciou.

Domnievame sa, že systémová ekológia, vrátane teórií týkajúcich sa zložitosti živých systémov, môže prispieť k rozvoju poznania ako vlastne fungujú ekosystémy a ekologicko-sociálne systémy, čo znamená ich ontická otvorenosť a ako napriek tejto ich otvorenosti a zložitosti zabezpečiť udržateľné využívanie a spravovanie ekologických systémov. Súčasne, v kombinácii s našou pokorou pred úžasnou zložitosťou neživého aj živého sveta, to môže prispieť aj k vytvoreniu systémového koncepčného rámca pre hľadanie dlhodobo udržateľných, naozaj fungujúcich ciest vývoja ľudskej spoločnosti.

Prioritou udržateľnej spoločnosti bude okrem zabezpečenia živobytia kvalita života a nie neustále rozširovanie materiálovej a energetickej spotreby, ako je tomu dnes. Poznanie, že podstatou dnešnej krízy je veľmi vysoká antropogénna entropizácia ekosystémov znamená, že „hospodárenie ako doposiaľ" (*business as usual*), ktoré deštruuje prírodný svet, už nemôže byť cestou. Vnímanie a poznávanie nesmiernej zložitosti pradiva života znamená, že kľúčom k riešeniu krízy je predovšetkým ochrana procesov a princípov, ktoré sú v tomto pradive prítomné, t.j. ochrana života (a jeho podmienok) v celej jeho šírke a hĺbke. Táto cesta je náročná, pretože musíme čeliť celému spektru degradačných procesov, ale žiada si aj našu cestu do pokory a skromnosti – ako podmienky úcty k životu a zníženia našej neudržateľne vysokej spotreby.

Nikto z nás nemá kam utiecť, ďalšie Zeme nie sú k dispozícii. Niekdajšie túžby o panstve nad prírodou nahrádza poznanie, že máme iba túto našu jednu spoločnú Zem a život na nej musíme s pokorou a úctou chrániť.

Autori

Malý výkladový slovník

Abundancia Početnosť resp. hojnosť výskytu sledovaných prvkov v konkrétnom priestore, napr. abundancia minerálov v zemskej kôre, abundancia jednotlivých druhov rastlín v biotope.

Acidifikácia oceánov Proces poklesu pH oceánov spôsobený zvýšenou absorpciou CO_2 z atmosféry, v dôsledku rastu koncentrácie CO_2 v atmosfére. V súčasnosti je oproti predindustriálnej dobe zaznamenaný pokles pH z hodnoty 8,2 na 8,1, čo znamená asi 30 %-né zvýšenie koncentrácie voľných vodíkových iónov H^+.

Acidifikácia pôdy Proces poklesu pH pôdy, ktorý nastáva pri intenzívnom hnojení (najmä pri používaní minerálnych hnojív), ale aj v dôsledku kyslých atmosférických depozícií, ktorých prekurzormi sú emisie síry a dusíka transportované na veľké vzdialenosti.

Adaptívny vývojový cyklus Model životného cyklu ekologického systému, ktorý zdôrazňuje jeho vysokú dynamiku Táto dynamika zahŕňa zákonité striedanie štyroch fáz: fázy rastu (akumulácie energie, v ekosystéme ide o fázu sukcesie), fázy konzervácie (kedy disipatívne procesy dosahujú maximálnu účinnosť, v ekosystéme zodpovedajú fáze klimaxu), fázy kolapsu (presnejšie fázy uvoľnenia naakumulovanej energie) a fázy reorganizácie, inovatívnej obnovy ekosystému.

Adiabatický proces Spočíva v ochladzovaní alebo otepľovaní vzduchu iba v dôsledku zmeny tlaku. Patrí k významným mechanizmom prenosu energie v atmosfére.

Aerosóly Miniatúrne heterogénne súbory tuhých, tekutých alebo zmesových častíc vznášajúcich sa v atmosfére, ktoré môžu byť prírodného aj antropogénneho pôvodu.

Agroenvironmentálny program Program, v ktorom poľnohospodári, najmä v rámci Európskej únie (ale aj iných štátov, napr. USA a Austrálie), na základe zmluvy s vládnou agentúrou prijímajú konkrétne záväzky týkajúce sa opatrení na ochranu zložiek životného prostredia v nimi obhospodarovanom území (najmä pôdy, vody a biodiverzity), za ktorých realizáciu dostávajú kompenzačné a podporné platby.

Agrochemikálie Chemikálie používané v poľnohospodárstve, zväčša sa pod nimi (zúžene) chápu iba pesticídy, avšak agrochemikálie zahŕňajú aj priemyselne vyrábané minerálne hnojivá, rastové stimulátory, desikanty a antibiotiká.

Amonifikácia Mineralizácia dusíku viazaného v organických látkach baktériami na amoniak.

Anticyklóna → ***Tlaková výš***

Antropocentrický Etický postoj a svetonázor, podľa ktorého sú ľudia najdôležitejšími entitami v nám známom vesmíre a hodnotu všetkým ostatným objektom tohto vesmíru prisudzuje iba človek.

Antropocén Označenie nového geologického obdobia, ktoré má vyjadriť súčasný rozhodujúci vplyv človeka na formovanie tváre Zeme. Začiatok antropocénu sa spája s nástupom priemyselnej revolúcie. Jeho súčasná fáza s najväčšími nepriaznivými vplyvmi človeka sa prekrýva s obdobím Veľkého zrýchlenia.

Antropogénna eutrofizácia → ***Kultúrna eutrofizácia***

Aridizácia Proces vysušovania konkrétneho územia. Aridnou oblasťou sa nazýva územie s nízkymi zrážkami a s nízkymi zásobami podzemnej vody, a tým aj s veľmi riedkym vegetačným pokryvom.

Ascendencia (ekosystému) Emergentná vlastnosť ekosystému, ktorá je funkciou toku energie cez jeho trofickú sieť. Platí, že čím vyšší tok energie, tým vyššia organizácia systému, preto ascendencia je dobrým indikátorom úrovne organizácie ekosystému a tým aj jeho kvality a reziliencie.

Asimilácia Prijímanie a premena látok organizmami, ktoré sú potrebné na výstavbu ich tela a zabezpečenie ich životných funkcií. V prípade rastlín sa asimilácia stotožňuje s fotosyntézou.

Asymetria (Nesúmernosť) Narušenie až absencia prirodzenej symetrie. Príkladom je biologická asymetria (napr. rastliny so striedavými listami), krajinná asymetria (napr. tvary horských hrebeňov) aj asymetria finančných príjmov alebo vlastníctva majetku v spoločnosti.

Asymetrická konkurencia Vzájomne silne neproporčná konzumácia limitovaných prírodných zdrojov

jednotlivými organizmami alebo druhmi, ktorá zvýhodňuje práve jedince a druhy, ktoré spotrebúvajú neproporčne veľké množstvo dostupných zdrojov. V prípade druhovej konkurencie to môže viesť až ku konkurenčnému vylúčeniu menej úspešného druhu zo spoločenstva.

Atmosféra Plynný obal Zeme, siahajúci do výšky niekoľko sto km, pripútaný k nej gravitačne a zúčastňujúci sa na zemskej rotácii. Je transparetná pre životodarnú časť slnečného žiarenia. Z neho získava teplo, ktoré spolu s vlhkosťou redistribuuje po zemskom povrchu. Funguje ako tepelný izolátor a poskytuje aj hlavné stavebné prvky pre život organizmov: uhlík (C), vodík (H), kyslík (O) a dusík (N).

Autenticita Miera reálnosti a pôvodnosti resp. prirodzenosti subjektu alebo objektu. V ekológii miera pôvodnosti (prírodnosti) resp. prirodzenosti štruktúry, dynamiky aj funkcií ekologického systému.

Autokatalytické cykly Cykly, v ktorých dochádza k sebareplikácii a posilneniu ich komponentov.

Autoorganizácia Spontánny vznik a vývoj usporiadaných fyzických štruktúr a na nich prebiehajúcich procesov a funkčných vzorcov resp. obrazcov (*patterns*). Ich zdrojom sú interakcie prvkov systému. Spontánnosť tu znamená, že ide o autonómny, samovoľný proces, ktorý nie je riadený zvonku systému. Príkladom je napr. rast organizmov, sukcesia spoločenstiev alebo postupný vznik a uzatváranie cyklov obehu látok vo vznikajúcich alebo obnovujúcich sa ekosystémoch.

Autopoietická sieť Sieť prvkov a procesov, v ktorej je úlohou každého prvku reagovať na aktivity jeho blízkych aj vzdialených susedov a prostredníctvom interakcií s nimi sa zúčastňovať na tvorbe alebo transformácii iných prvkov siete. Autopoietická sieť takto neustále pretvára a súčasne udržiava samú seba.

Autopoiéza Schopnosť systému spontánne vytvárať, udržiavať, uchovávať a reprodukovať samého seba.

Autoregulácia Spontánne udržiavanie fyzickej štruktúry a správania živého systému, prostredníctvom detekcií zmien vonkajšieho prostredia a napriek týmto zmenám udržiavanie podstatných charakteristík systému. Základom autoregulácie je princíp zápornej spätnej väzby.

Azonálna vegetácia Vegetácia, ktorá sa vytvára pod vplyvom špecifických pôdnych podmienok (napr. vegetácia mokradí, slanísk, pieskov, skál), alebo vznikla v dôsledku pôsobenia človeka (napr. vegetácia lúk, pasienkov a oráčin alebo vegetácia nepôvodných drevín v hospodárskom lese). Tieto edafické (pôdne) pomery potláčajú vplyv podnebia či expozície, ktoré dominantne podmieňujú vývoj zonálnej vegetácie. Z hľadiska vývoja vegetácie reprezentujú edafický klimax.

Atóm Miniatúrna stavebná jednotka chemických prvkov a teda všetkej hmoty vo vesmíre. Atómy samotné sú však tvorené ešte menšími subatómovými časticami.

Atraktor Stav alebo postupnosť stavov, do ktorých je systém priťahovaný.

Behaviorálna zložitosť → ***Funkčná zložitosť***

Bentické organizmy Organizmy žijúce v na dne, v dnových sedimentoch alebo blízko dna mora, vodného toku, jazera alebo vodnej nádrže.

Bifurkačný bod Prah, za ktorým systém môže náhle prejsť do nového usporiadania, ktoré charakterizuje nová štruktúra a nové správanie (nové postupnosti stavov, ktorými systém prechádza).

Bifurkácia Proces náhlej kvalitatívnej zmeny organizácie systému. (V matematike rozdelenie vývojovej trajektórie do niekoľkých kvalitatívne rozdielnych štruktúr, v geografii napr. vetvenie riek.)

Bioakumulácia Postupná akumulácia určitých, spravidla toxických a ťažko odbúrateľných chemických látok v organizme, napr. ťažkých kovov alebo perzistentných organických polutantov, ku ktorým patria aj pesticídy.

Biocenóza Vzájomne integrované zoskupenie populácií rôznych druhov organizmov, ktoré v rovnakom čase žijú na spoločnom stanovišti (obývajú spoločný priestor).

Biocentrický Etický postoj a svetonázor, podľa ktorého majú všetky živé objekty svoju vlastnú hodnotu, nezávislú od človeka. Človek má preto povinnosť chrániť živú prírodu, to však nestačí, mal by jej prisúdiť aj konkrétne práva (napr. práva stromov, zvierat, riek, údolí a lesov).

Biocentrum Spravidla prírode blízky biotop alebo skupina biotopov, ktorá umožňuje trvalé prežívanie a rozmnožovanie ich rastlinných a živočíšnych druhov a tým aj trvalé prežívanie ich spoločenstiev.

Biodiverzita Biologická rozmanitosť (rozmanitosť životných foriem), zahŕňa v sebe genetickú diverzitu (variabilitu génov v rámci druhov), druhovú diverzitu (variabilita druhov v rámci ekosystémov) a ekosystémovú a krajinnú diverzitu (diverzitu ekosystémov v rámci Zeme).

Biofyzikálny Zahŕňajúci biotické zložky prostredia (organizmy, populácie, spoločenstvá) a abiotické zložky (geologický podklad, reliéf, pôdu, vodu, klímu a ovzdušie).

Biogénne prvky Chemické prvky, ktoré sú konštantne prítomné v organizmoch, zúčastňujú sa ich metabolizmu a sú nevyhnutné pre ich prežívanie, rast a rozmnožovanie.

Biogeografická provincia, biogeografická oblasť (biogeografický región) Vyššie Individuálne jednotky biogeografického členenia krajiny, pomerne rozsiahle územie s charakteristickou vegetačnou stupňovitosťou a so svojráznymi druhmi rastlín, húb a živočíchov.

Biogeochemické cykly Kontinuálny obeh vody, živín a ďalších chemických prvkov medzi atmosférou, hydrosférou, litosférou, pedosférou a biotou prostredníctvom fyzikálnych, chemických a biologických procesov. Tieto cykly poháňa slnečná energia, zemská gravitácia a pôsobenie živých organizmov.

Biokapacita Odhadovaná ročná biologická produkcia krajiny využívanej daným jedincom alebo spoločnosťou na čerpanie zdrojov alebo absorpciu odpadov (napr. absorpcia CO_2 lesmi), ktorá môže byť využitá bez toho aby dochádzalo k vyčerpávaniu zdrojov alebo k zmenám ekosystémov.

Biokoridor Spravidla líniový útvar vytváraný biotopmi, ktoré umožňujú šírenie sa a migráciu rastlín a živočíchov medzi biotopmi (biocentrami a interakčnými prvkami), ktoré by inak boli v dôsledku ľudských aktivít v krajine vzájomne izolované. Biokoridorom sú napr. pásy krovín a lesa, aleje, medze, vodné toky.

Biologická degradácia pôdy Spočíva v úbytku obsahu organických zlúčenín ako aj živých organizmov v pôde, od baktérií a húb až po drobnú pôdnu faunu. Dôsledkom je strata prirodzenej pôdnej štruktúry, úbytok kapacity pôdy zadržiavať vodu a živiny, až strata procesov prirodzenej obnovy živín v pôde.

Biologická evolúcia Dlhodobý spontánny proces postupných genetických zmien organizmov v priebehu postupnosti generácií, ktorý vedie ku genetickej variabilite v rámci populácií a v kombinácii s procesmi prírodného výberu tiež k úspešnému prežívaniu a rozmnožovaniu najschopnejších jedincov, čo za dostatočne dlhý čas môže viesť k vzniku nových druhov. Týmto procesom sa postupne zvyšuje rozmanitosť druhov žijúcich na Zemi. Jeho výsledkom je súčasná biodiverzita.

Biologická invázia Rýchle a hromadné prenikanie nepôvodných druhov (neúmyselne zavlečených alebo introdukovaných človekom) do biotopov a spoločenstiev, v ktorých sa prirodzene nevyskytovali. Tieto druhy sa spravidla nekontrolovateľne šíria a môžu ohrozovať pôvodné druhy, ľudské zdravie a spôsobovať ekonomické a ekologické škody.

Biomagnifikácia Biologické zosilňovanie, postupné zvyšovanie koncentrácie určitých, spravidla toxických a ťažko odbúrateľných chemických látok v organizme smerom k vyšším úrovniam potravového reťazca.

Bióm Mimoriadne rozsiahla biogeografická zóna s rovnakými makroklimatickými podmienkami, ktorú charakterizuje dominantný typ prirodzenej vegetácie, s jej charakteristickou štruktúrou (napr. etážovité usporiadanie lesného porastu), ako aj typické a špecifické adaptácie druhov k ich prostrediu.

Biopalivá Plynné a kvapalné palivá, ktoré sú technologickými postupmi vyprodukované z biomasy alebo z biologického odpadu a využívané predovšetkým v doprave. Predstavujú obnoviteľný zdroj energie, avšak ak ich využitie nerešpektuje environmentálne limity, ide o kontroverzný zdroj (napr. v prípade výrubov tropických pralesov kvôli produkcii palmového oleja pre výrobu bionafty).

Biosféra Sféra s vhodnými podmienkami pre život, zóna života na prieniku atmosféry, hydrosféry a litosféry, ktorá zahŕňa všetky živé organizmy a ekosystémy Zeme.

Biosférická rezervácia Súčasť Svetovej sústavy biosférických rezervácií (BR, rezerv biosféry), ktorá sa vytvára v rámci medzivládneho Programu UNESCO Človek a biosféra (*Man and the Biosphere – MAB*). Cieľom je integrácia ochrany biodiverzity s udržateľným využívaním krajiny a prírodných zdrojov. Preto je každá BR členená na tri zóny, z ktorých každá má svoju hlavnú funkciu: ochranársku (zachovanie biologickej a krajinnej rozmanitosti), rozvojovú (podpora udržateľného hospodárskeho a ľudského rozvoja), a podpornú logistickú (podpora environmentálneho vzdelávania a výchovy, výskumu a monitoringu).

Bod obratu Bod na pomyselnej vývojovej krivke civilizácie, ktorý vyjadruje hranicu, po prekonaní ktorej hrozí vážne reálne riziko rozpadu civilizácie. Vyjadruje krízu doby, ale súčasne aj príležitosť k zmene smerovania spoločnosti.

Bunka Najmenšia živá organizačná entita organizmu (štrukturálna a funkčná jednotka). Od okolia ju oddeľuje semipermeabilná cytoplazmatická membrána. Bunka obsahuje cytoplazmu a organely, cytoplazmu tvorí voda a organické i anorganické zlúčeniny, rozpustené cukry, ióny a proteíny. Bunka môže byť samostatným organizmom alebo súčasťou kolónie, či mnohobunkového organizmu.

Bunková teória Teória, že živé organizmy sú vytvorené z buniek, ktoré sú základnými štrukturálnymi jednotkami organizmu a že všetky bunky vznikajú z pred nimi existujúcich buniek.

Cirkulárna ekonomika → ***Obehová ekonomika***

Citeľné teplo Teplo, ktoré spôsobuje zmenu teploty telesa dodávaním alebo odoberaním tepla. Príkladom je teplo, ktoré ohrieva troposféru v dôsledku zohriatia zemského povrchu.

Cudzie druhy → ***Nepôvodné druhy***

Cyklóna → ***Tlaková níž***

Cyklus Zokruhovanie postupností interakcií medzi prvkami systému. Cykly sú základom spätných väzieb.

Cyklus uhlíka Kolobeh uhlíka v podobe rôznych chemických zlúčenín medzi jeho abiotickými a biotickými zásobníkmi, to znamená kolobeh uhlíka medzi živými organizmami a ich prostredím.

Cyklus dusíka / cyklus fosforu Kolobeh dusíka / kolobeh fosforu v podobe jeho rôznych chemických zlúčenín medzi jeho abiotickými a biotickými zásobníkmi, to znamená kolobeh medzi živými organizmami a ich prostredím.

Cyklus síry Kolobeh síry v podobe jej rôznych chemických zlúčenín medzi jej abiotickými a biotickými zásobníkmi, to znamená medzi živými organizmami a ich prostredím.

Denudácia Súbor pochodov, ktoré spočívajú v obnažovaní pevných podložných hornín procesmi zvetrávania, erózie a svahových pohybov. Tieto procesy vedú k odnášaniu rozrušených hornín a v konečnom dôsledku k zarovnávaniu zemského povrchu.

Desikanty Látky ľahko a účinne pohlcujúce vzdušnú vlhkosť, v poľnohospodárstve používané napr. na vysušovanie plodín.

Detrit Neživá organická hmota, časti odumretých organizmov, odumreté mikroorganizmy, peľ, nektár a exkrementy zvierat.

Dezertifikácia Najvyšší stupeň fyzikálnej, chemickej a biologickej degradácie pôdy pôsobením prírodných alebo antropogénnych procesov, ktoré vedú k výraznému úbytku až strate jej funkcií, vrátane jej schopnosti produkovať biomasu a v konečnom štádiu k premene krajiny na polopúšť alebo púšť. Dezertifikácia je najvyššia v aridných a semiarídnych oblastiach, ale k degradácii pôdy a rapídnemu poklesu jej schopnosti viazať vodu a živiny prispieva aj priemyselné poľnohospodárstvo.

Diaspóra (propagačná jednotka, rozširovacie teliesko) Ktorákoľvek časť rastliny, ktorá je oddeľovaná od rodičovskej rastliny a slúži jej k rozmnožovaniu bez ohľadu na to, či ide o rozmnožovanie pohlavné, nepohlavné alebo vegetatívne (výtrus, semeno, nepukavý plod, vegetatívna pacibuľka, cibuľka a pod.).

Disipatívna organizácia Autoorganizačná a autoregulačná aktivita termodynamicky otvorených systémov, ktorú vyvoláva prísun energie. Jej výsledkom je vznik a vývoj disipatívnych štruktúr a disipatívnych procesov.

Disipatívna štruktúra Fyzická štruktúra, ktorá v danom systéme spontánne vzniká a vyvíja sa v dôsledku vychýlenia systému zo stavu termodynamickej rovnováhy. Na nej prebiehajú disipatívne procesy, ktoré vyrovnávajú energetický gradient, ktorý vyvoláva prísun energie do systému.

Disipatívny proces Ireverzibilný (nevratný) proces transformácie a disipácie energie, ktorými sa systém vysporadúva s viac-menej kontinuálnym prísunom energie. Disipatívny proces produkuje entropiu, čím vyššia entropia, tým vyššia účinnosť disipácie energie.

Disipatívny Termodynamicky otvorený systém, vychýlený (zväčša ďaleko) od bodu jeho termodynamickej rovnováhy, ktorý je tvorený disipatívnymi štruktúrami, na ktorých sa realizujú dispatívne procesy. Príkladmi disipatívnych systémov v neživej prírode sú napr. tlaková níž, tlaková výš alebo morské prúdy. Disipatívnymi systémami v živej prírode sú bunky, organizmy a ekologické systémy.

Disipácia energie Transformácia energie, ktorej výsledkom je energia s menšou exergiou, t.j. s nižšou schopnosťou konať prácu. Vyjadrením procesu disipácie energie je produkcia entropie. Napr. pri transformácii chemickej energie organických zlúčenín pri metabolických procesoch organizmu sa jej časť mení na teplo – disipovanú energiu nižšej kvality, ktorú organizmus exportuje ako entropiu za svoje hranice.

Disturbancia (v ekológii) Náhla vonkajšia udalosť, ktorá (spravidla dočasne) narúša štruktúru spoločenstva alebo ekosystému, ekologické podmienky a procesy. Rozlišujú sa prírodné a antropogénne disturbancie, k prírodným patria napr. víchrice, povodne, suchá, k antropogénnym napr. kosba lúk. Disturbancie charakterizuje frekvencia ich výskytu, intenzita, priestorový rozsah a následky.

Divočina Prírodné ekosystémy (najmä terestrické), ktoré neboli výrazne zmenené činnosťou človeka a zachovali si pôvodné druhové zloženie a v prípade lesov aj prirodzenú rôznovekú štruktúru drevín a súčasne majú dostatočne veľkú výmeru aby v nich mohli prebiehať prirodzené biologické a ekologické procesy.

DNA (deoxyribonukleová kyselina) Nukleová kyselina, biologická makromolekula vo forme reťazca nukleotidov, nosič genetickej informácie takmer všetkých organizmov (výnimkou sú napr. niektoré víry). DNA kóduje tvorbu bielkovín a cez ňu usmerňuje vývoj, štruktúru a správanie celého organizmu.

DPSIR rámec Rámec pre analýzu environmentálnych problémov. Analyzuje hybné sily (*drivers*), antropogénny tlak (*pressure*), stav ekosystémov (*state*), impakty na ekosystémy *(impacts*) a odpoveď spoločnosti (*response).*

Druh Základná taxonomická jednotka organizmov spoločného pôvodu, ktoré sa odlišujú od iných jedincov, môžu sa vzájomne krížiť a mať plodných potomkov. To znamená aj odovzdávať genetickú informáciu, a tým aj typické vlastnosti druhu do ďalšej generácie. Jedinci populácií druhu sú zároveň geneticky izolovaní od jedincov iného druhu.

Druhová (taxonomická) diverzita Biologická rozmanitosť na úrovni druhov resp. taxónov.

Druhý termodynamický zákon Entropia žiadneho izolovaného systému nemôže v čase klesať, naopak pri všetkých procesoch transformácie energie rastie. Príčinou rastu entropie je, že pri každej zmene energie z jednej formy na druhú dochádza k degradácii určitej časti tejto energie na menej kvalitnú, ktorá má nižšiu schopnosť konať prácu, je menej koncentrovaná, viac rozptýlená a menej užitočná.

Dynamika (systému) Pohyb a zmena prvkov systému, ktorá sa prejavuje v správaní sa systému.

Dynamika ekologického systému Pohyb, vývoj a zmeny biotických, ale aj biotických prvkov ekologického systému, prejavujúca sa v jeho správaní sa – raste biomasy, sukcesnom a evolučnom vývoji, v prírodných narušeniach, dezintegrácii, ale aj v obnove (reorganizácii) systému.

Edafón Živá zložka pôdy, ktorú tvoria korene rastlín, mikroorganizmy a drobné živočíchy.

Ekologická nika Funkčné postavenie, rola (úloha) príslušného druhu v ekosystéme a zároveň súhrn abiotických a biotických podmienok prostredia, ktoré organizmus daného druhu potrebuje k svojmu prežitiu, rastu a rozmnožovaniu.

Ekologická integrita Miera neporušenosti, autenticity (pôvodnosti a prirodzenosti usporiadania), funkčnosti a reziliencie ekologického systému. Ide o schopnosť systému fungovať spontánne na báze

pôvodných autoorganizačných a autoregulačných mechanizmov, pri súčasnom zachovaní pôvodnej alebo prirodzenej štruktúry, kompozície, funkčnosti a prirodzenej (optimálnej) úrovne jeho zložitosti, pri ktorej je aj vitalita, funkčnosť a reziliencia daného systému najvyššia.

Ekologická odolnosť Schopnosť spoločenstva, ekosystému alebo krajiny ako celku svojimi vlastnými autoregulačnými mechanizmami pretrvávať a reprodukovať svoje podstatné charakteristiky aj v podmienkach narušenia zvonku (do určitej miery narušenia).

Ekologická pružnosť Schopnosť spoločenstva, ekosystému alebo krajiny ako celku vrátiť sa do stavu svojej dynamickej rovnováhy po odoznení narušenia, ktoré zmenu ekosystému vyvolalo. Všeobecne sa považuje za kritický faktor určujúci schopnosť ekologickej rovnováhy.

Ekologická stopa Rozloha krajiny udávaná v tzv. globálnych hektároch (gha), ktorú spoločnosť (alebo jedinec) potrebuje na získanie všetkých ňou spotrebúvaných prírodných zdrojov a na absorpciu alebo neutralizáciu všetkých ňou produkovaných odpadov.

Ekologická rovnováha Dynamicky vyvážené a pre celok prospešné vzájomné pôsobenie jednotlivých prvkov ekosystému, ktoré z neho vytvára integrovaný a funkčný celok.

Ekologická sieť Pojem sa používa vo viacerých významoch. **1. potravná (trofická) sieť** ekosystému, ktorá vyjadruje trofické vzťahy medzi autotrofnými organizmami a konzumentami rôznych rádov. **2. interakčná sieť,** ktorá je rozšírením trofickej siete. Jej uzly predstavujú jednotlivé organizmy. Ich vertikálne spojenia vyjadrujú trofické vzťahy medzi organizmami susedných trofických úrovní a horizontálne spojenia vyjadrujú konkurenčné alebo mutualistické vzťahy v rámci jednotlivých úrovní. **3. horizontálna ekologická sieť** v krajine, ktorej uzly predstavujú ekologicky významné krajinné prvky, resp. jadrové územia alebo biocentrá, a prepojenia medzi nimi predstavujú ekologické koridory, resp. biokoridory, ktorými sa v krajine šíria a migrujú jednotlivé organizmy.

Ekologická stabilita Schopnosť ekosystému alebo krajiny vyrovnávať pôsobenie vplyvov a zmien jeho okolia a napriek vonkajším tlakom si zachovávať svoju prirodzenú štruktúru (vrátane prirodzeného druhového zloženia resp. prirodzenej kompozície biotopov), charakteristické vlastnosti a funkcie.

Ekologická stopa Rozloha biologicky produktívneho priestoru krajiny, ktorý je potrebný pre zabezpečenie všetkých prírodných zdrojov, ktoré daná spoločnosť využíva a pre absorbovanie všetkých jej odpadov. Ekologická stopa patrí k významným a široko využívaným indikátorom udržateľného rozvoja.

Ekologická únosnosť Najvyššia ekologicky prípustná miera využívania ekologického systému (napr. populácie, spoločenstva, ekosystému, krajiny), jeho schopnosť uniesť takú úroveň využívania, aby nedošlo k nevratným nepriaznivým zmenám jeho fyzickej štruktúry, dynamiky a funkcií.

Ekologická vzdialenosť Miera rozdielnosti dvoch porovnávaných spoločenstiev alebo ekosystémov, vyjadrená najmä rozdielmi v ich kompozícii (druhovom zložení a abundancii druhov), dynamike a funkciách.

Ekologická zložitosť Štrukturálna a funkčná zložitosť, komplexita ekologických systémov (napr. zložitosť populácií, spoločenstiev, ekosystémov, krajín, ekoregiónov, biómov a Zemského systému). Každý ekologický systém má svoju prirodzenú (optimálnu) úroveň zložitosti, pri ktorej je jeho vitalita, funkčnosť aj reziliencia najvyššia.

Ekologické cykly Rytmické zokruhovanie a opakovanie postupností interakcií (procesov) v rámci autopoietických ekologických sietí. (Patria sem aj všetky biogeochemické cykly.)

Ekologické hranice → ***Ekologické limity***

Ekologické limity Prahy záťaže ekologického systému, po prekročení ktorých sa systém ocitá v priestore rizík náhlych a nevratných, spravidla nepriaznivých zmien. Tieto limity existujú od úrovne miestnych ekosystémov (napr. záťaž pasienku dobytkom) až po planetárne život udržujúce systémy (napr. zmena klímy po prekročení prahu emisií oxidu uhličitého).

Ekológia Veda o interakciách medzi organizmami navzájom, ako aj medzi organizmami a ich prostredím. Systémovejší pohľad hovorí, že ekológia je veda o štruktúre a funkciách prírody, pričom štruktúra zahŕňa aj vplyvy abiotických a biotických zložiek na rozšírenie a hojnosť organizmov a funkcie zahŕňajú všetky

aspekty ich rastu a vývoja, ako aj vnútrodruhových a medzidruhových interakcií.

Ekológia krajiny → ***Krajinná ekológia***

Ekoregión Pomerne rozsiahla ekologicky a geograficky definovaná oblasť, avšak menšia ako bióm, ktorá obsahuje zreteľne odlíšené a pre ekoregión charakteristické zoskupenia prírodných spoločenstiev a druhov. V súčasnosti je na Zemi vyčlenených 867 terestrických a 232 morských ekoregiónov.

Ekosféra Recentná biosféra chápaná ako globálny zemský ekosystém, t.j. ekosystém najvyššej úrovne hierarchie.

Ekostabilizačné prvky Krajinné prvky, napr. lesné enklávy, remízky, brehové porasty, líniové porasty drevín, druhovo pestré travinné porasty, ovocné sady, mokrade a pod., ktoré v krajine vyrovnávajú nepriaznivé pôsobenie ekologicky labilných komponentov, ako sú napr. zastavané plochy, cesty a oráčiny.

Ekosystém Vysoko organizovaná, dynamická a často i fyziognomicky rozpoznateľná funkčná entita prírody. Jej živé prvky tvoria spoločenstvá rastlín, húb, živočíchov a mikroorganizmov, ktoré interagujú navzájom a súčasne s ich abiotickým prostredím (reliéf, horniny, pôda, voda, ovzdušie, klíma) čím vytvárajú integrovaný celok. Ekosystém charakterizujú jeho hranice a fyzická štruktúra, interakcie živých organizmov a ich interakcie s ich abiotickým prostredím, ako aj určitá dynamika jeho vývoja a prírodných narušení.

Ekosystémový prístup Koncepcia resp. stratégia integrovaného manažmentu pôdy, vody, ovzdušia a biologických zdrojov na vedeckom základe. Ekosystémový prístup sa sústreďuje na vzťahy medzi prvkami resp. celkom ekosystému a človekom, ako aj na tendencie ich vývoja, ktorých poznanie by malo viesť k efektívnemu manažmentu ekosystémov a tým aj k ochrane život udržujúcich systémov Zeme.

Ekosystémové služby Funkcie ekosystémov, z ktorých má ľudská spoločnosť konkrétne úžitky. Ich klasické členenie zahŕňa 1) regulačné ES, ktoré regulujú podstatné ekologické procesy (napr. biogeochemické cykly); 2) podporné (biotopové) ES, ktoré poskytujú biotopy pre organizmy; 3) produkčné ES, ktoré spočívajú v produkcii živej biomasy a 4) informačné (kultúrne) ES, ktoré poskytujú príležitosti pre poznávanie, výskum, ale aj turistiku, rekreáciu, zakúšanie krásy a duchovné obohatenie. V modernejšom členení sa regulačné a podporné služby spájajú do jednej kategórie.

Elektrická sila Sila, ktorou na seba pôsobia telesá s elektrickým nábojom, telesá s opačným nábojom sa priťahujú, telesá s rovnakým nábojom sa odpudzujú. Táto sila udržiava pokope atómy aj zlúčeniny spojené iónovými väzbami.

Elektrón Elementárna častica s extrémne malou hmotnosťou a jednotkovým záporným elektrickým nábojom, pohybujúca sa okolo jadra atómu v pomerne veľkých vzdialenostiach (vzhľadom k veľkosti jadra).

Emergentné vlastnosti Nové vlastnosti systému, ktoré ešte nie sú pozorovateľné na úrovni jeho prvkov, ale v dôsledku ich interakcií sa „vynárajú“ až na organizačnej úrovni systému ako celku.

Emisie Znečisťujúce látky emitované do ovzdušia v menšej miere prírodnými procesmi (napr. sopečná činnosť), v súčasnosti však v rozhodujúcej miere antropogénnymi zdrojmi (napr. emisie z energetiky, dopravy, priemyslu, sídel aj poľnohospodárstva). Znečisťujúce látky prítomné v ovzduší sa nazývajú imisie.

Endemity Taxóny, ktoré sa prirodzene vyskytujú iba na určitom geograficky obmedzenom území. Môže ísť o endemity vyskytujúce sa len v určitom regióne, pohorí, údolí, vrchu alebo na malej lokalite.

Endokrinné disruptory Spravidla syntetické chemické látky, ktoré imitujú funkciu hormónov, zasahujú do prirodzenej funkcie hormonálnej (endokrinnej) sústavy čím môžu narúšať jej činnosť a vyvolávať rôzne ochorenia človeka alebo iných živočíchov.

Energia Skalárna fyzikálna veličina, ktorá predstavuje schopnosť hmoty konať prácu (t.j. vykonať pohyb, zmenu, transformáciu) alebo prenášať teplo. Energiu nie je možné vytvoriť ani zničiť, možno ju len transformovať z jednej formy na inú. Energia môže mať rôzne formy, napr. kinetická, polohová energia.

Energia elektromagnetického žiarenia Forma kinetickej energie, ktorá sa šíri ako elektromagnetické vlny, ako kombinácia vlnenia elektrického a magnetického poľa. Toto žiarenie sa člení podľa dĺžky jeho vĺn a energie, napr. gama žiarenie, röntgenové, ultrafialové, viditeľné svetlo, infračervené, rádiové.

Entropia Miera neurčitosti resp. neusporiadanosti systému, napr. v prípade narušenia prírodných systémov miera dezintegrácie daného systému. Živé systémy produkujú entropiu v dôsledku degradácie časti energie pri jej transformácii na inú formu. Takto vzniknutú energiu s nízkou exergiou, tieto systémy exportujú do okolia vo forme dlhovlnného elektromagnetického žiarenia.

Entropizácia Rast entropie v systéme, napr. v Zemskom systéme v dôsledku rozsiahleho a rastúceho antropogénneho narúšania ekosystémov. Entropizácia Zemského systému sa prejavuje likvidáciou, fragmentáciou, znečisťovaním a inou degradáciou ekosystémov.

Environmentálna certifikácia Udelenie známky určitej environmentálnej kvality konkrétnym subjektom (napr. podnikateľom, obciam a mestám) za dobrovoľne prijaté a napĺňané záväzky týkajúce sa dodržiavania opatrení v oblasti šetrenia prírodných zdrojov, ochrany pôdy, vody, ovzdušia a biodiverzity.

Environmentálna etika Súbor zásad, pravidiel, predpisov a ašpirácií, ktoré by sme mali dodržiavať vo vzťahu k mimoľudskému svetu. Táto etika prírodným objektom zväčša prisudzuje ich vlastnú hodnotu, nezávislú od ich úžitku pre človeka.

Environmentálna kríza Situácia, kedy je v dôsledku rozsiahlej degradácie životného prostredia ohrozená existencia a prosperita ľudskej spoločnosti. Keďže táto kríza má v súčasnosti už globálne rozmery, hovoríme o globálnej environmentálnej kríze, ktorá ohrozuje budúcnosť našej civilizácie.

Environmentálna veda (environmentalistika) Interdisciplinárna veda, ktorá sa zaoberá životným prostredím a jeho zmenami, vplyvmi človeka a riešeniami environmentálnych problémov. Cieľom je porozumieť ako človek vplýva na biologické a ekologické procesy, čo je základom prevencie aj nápravy už vzniknutých škôd na ekosystémoch a zložkách životného prostredia.

Environmentálny aktivizmus (environmentálne hnutie) Aktivity občanov a mimovládnych organizácií požadujúce zákony, postupy a rozhodnutia na riešenie otázok znečistenia životného prostredia a degradácie ekosystémov, úbytku biodiverzity a ochrany prírody.

Environmentálny problém Dôsledok takých ľudských aktivít, ktoré vedú k výraznému zhoršeniu kvality životného prostredia a tým často aj ľudského zdravia.

Environmentálny žiaľ (environmentálna úzkosť) Úzkostné obavy o seba a o vlastných potomkov vyplývajúce z vnímania environmentálnych problémov, vedúce až k strate zmyslu života, nárastu agresivity alebo naopak pocitov viny za stav Zeme a tým k hlbokým depresiám.

Epigenetické mechanizmy Mechanizmy zodpovedné za reguláciu prejavu (expresie) génov vo fenotype, vrátane aktivácie a inaktivácie jednotlivých génov.

Epigenetika Vedný pododbor genetiky študujúci zmeny v génovej expresii (prejave génu), ktoré nie sú spôsobené zmenou nukleotidovej sekvencie DNA.

Erózia Prirodzený fyzikálny proces rozrušovania pôdy a hornín, pôsobením vody, vetra aj organizmov a za súčinnosti gravitácie transport takto vzniknutého materiálu po zemskom povrchu. Erózia pôdy znamená predovšetkým úbytok vrchnej vrstvy pôdy. Ide o prirodzený proces, ktorý však ľudské aktivity, najmä v priemyselnom poľnohospodárstve, zväčša mnohonásobne zosilňujú (urýchľujú).

Eukaryotická bunka Bunka, ktorá má odlíšené a membránou chránené jadro. Membrány chránia aj ďalšie špecifické organely, ako sú napr. mitochondrie, chloroplasty (v prípade zelených rastlín a rias), Golgiho aparát a ďalšie. V prevažnej miere (hoci nie vždy) ide o bunky mnohobunkových organizmov.

Evaporácia Premena kvapaliny na jej povrchu na plynnú fázu (vyparovanie).

Evapotranspirácia Súhrn procesov evaporácie a transpirácie (napr. v ekosystéme alebo krajine).

Evolúcia → ***Biologická evolúcia***

Exergia Vyjadrenie kvantity a súčasne aj kvality energie. Exergia je maximálna možná užitočná práca, ktorú je systém schopný vykonať, kým sa dostane do tepelnej rovnováhy so svojím okolím. Vysokokvalitná, koncentrovaná energia (napr. energia slnečného žiarenia) má vysokú exergiu.

Exkrement (výkal) Výlučok organizmu vzniknutý z nestrávených zvyškov potravy v tráviacej sústave živočícha.

Expanzia Proces rastu – zväčšovania, predlžovania, rozširovania, rozpínania alebo rozťahovania.

Extrazonálna (intrazonálna) vegetácia Vznikla vplyvom špecifických mikroklimatických a pôdnych podmienok, podobá sa určitému typu zonálnej vegetácie, ale vyskytuje sa na malých plochách vnútri úplne inej vegetačnej zóny (napr. listnaté lesy v stepnej zóne, na vlhkejších severných svahoch.)

Fenotyp Pozorovateľné charakteristiky organizmu nazývané znaky. Zahŕňajú morfológiu organizmu, jeho fyzikálne a biochemické vlastnosti, procesy jeho vývoja a jeho správanie.

Fenotypová plasticita Vzniká zmenami morfológie, fyziológie, fenológie alebo správania organizmu, ako reakcia na stav jeho konkrétneho prostredia a zvyšuje pravdepodobnosť prežívania populácie v novom prostredí. Z tohto dôvodu je dôležitá predovšetkým pre imobilné organizmy, napr. rastliny.

Fertilita (plodnosť) Priemerný počet pôrodov na ženu resp. samicu v určitej populácii.

Fibonacciho čísla Postupnosť čísel, v ktorom je nasledujúce číslo vždy súčtom dvoch predchádzajúcich, t.j. 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, atď. Niektorí autori poukazujú na príklady Fibonacciho čísel v prírode (napr. v organizácii špirál vnútorných kvetov a tým aj semien slnečnice alebo ulít ulitníkov). Zaujímavé je, že podiel dvoch po sebe nasledujúcich Fibonacciho čísel postupne konverguje k číslu 1,618, známemu v architektúre ako zlatý rez.

Fosílne palivá Nerastné suroviny, ktoré vznikli v dávnej minulosti dekompozíciou odumretých rastlín a živočíchov bez prístupu vzduchu a pôsobením vysokého tlaku a teploty v zemskej kôre. Patrí k nim predovšetkým uhlie, ropa a zemný plyn.

Fotosyntéza Zložitý biochemický proces zachytávania energie svetelnej zložky spektra slnečného žiarenia a jej transformácie na energiu chemických väzieb v sacharidoch (cukroch). Fotosyntéza prebieha v chloroplastoch zelených rastlín, ale aj rias, siníc a niektorých iných baktérií, ktoré k tomuto procesu potrebujú prísun oxidu uhličitého (CO_2) a vody.

Fragmentácia biotopu Rozčlenenie biotopu na menšie celky, ktoré súčasne znamená fragmentáciu populácií druhov, ktoré ho obývajú a tým zmenšenie ich populácií, ktoré v dôsledku úbytku environmentálnej variability zvyšuje riziko vyhynutia malých populácií.

Funkcia (v biológii a ekológii) Účinok, ktorý je výsledkom synergie procesov prebiehajúcich na fyzickej štruktúre živého systému, napr. vodozdržná (retenčná) funkcia lesa.

Funkčná (behaviorálna) zložka ekologickej zložitosti Vyjadruje zložitosť procesov prebiehajúcich na fyzickej štruktúre ekologického (alebo sociálne-ekologického) systému, ktorých synergickým výsledkom je aj zložitosť správania sa daného systému, vrátane zložitosti jeho funkcií.

Funkčná zložitosť (v biológii a ekológii) Zložitosť funkcií a správania sa systému, od živej bunky cez organizmy až po ekosystémy.

Funkčnosť (v biológii a ekológii) Poskytovanie funkcií a udržiavanie charakteristických vlastností systému. V ekosystéme sú to produkčné, regulačné, biotopové a kultúrne funkcie, ktoré prestavujú ponuku jeho ekosystémových služieb pre ľudskú spoločnosť.

Fytomasa Objem živej rastlinnej hmoty vytvorenej procesmi fotosyntézy, súčasť biomasy.

Fyzická štruktúra systému Fyzické priestorové rozmiestnenie prvkov (vnútri hraníc systému), ich druhy, počty a vzájomné vzťahy.

Genetická informácia Informácia o organizme (o tvorbe potrebných proteínov v jednotlivých bunkách a fázach života organizmu), ktorá je zakódovaná a pamätá sa v molekulách jeho deoxyribonukleovej kyseliny (DNA). Úseky DNA zodpovedajúce jednotkám tejto informácie sa nazývajú gény. Súbor všetkých génov v chromozómoch jadra bunky sa nazýva genóm.

Genetická rezistencia Genetickými zmenami zvýšená odolnosť voči pôsobeniu určitých patogénov, ale tiež chemických látok (napr. genetická rezistencia voči pesticídom).

Geneticky modifikovaný organizmus Organizmus, ktorého genetický materiál bol úmyselne zmenený inžinierskymi technickými postupmi, ktoré spočívajú vo vnášaní, posilnení, deaktivovaní alebo inej zmene konkrétnych génov.

Gén Základná jednotka dedičnosti tvorená DNA, nosičom genetickej informácie.

Geotermálna energia Tepelná energia, ktorej zdrojom je rádioaktívny rozpad minerálov v zemskej kôre a predovšetkým v zemskom jadre.

Gilda Skupina jedincov viacerých druhov organizmov s rovnakým funkčným alebo priestorovým postavením v ekosystéme, t.j. využívajúcich aj rovnaké zdroje (napr. gilda hmyzožravého vtáctva).

Globálna cirkulácia atmosféry Pomerne pravidelný celoplanetárny pohyb vzduchových más, ktorý vyvoláva synergia viacerých faktorov, okrem nerovnomerného zohrievania a ochladzovania zemského povrchu najmä rotácia Zeme. Spolu s cirkuláciou oceánov distribuuje po planéte energiu a vodu.

Gravitácia Vzájomná príťažlivosť medzi ľubovoľnými dvoma hmotnými telesami, ktorí a dáva váhu fyzickým objektom. Udržiava pohromade telesá zložené z atómov, ale aj hviezdy a planéty na ich obežných dráhach.

Hadleyho bunka Bunka cirkulácie atmosféry v nízkych zemepisných šírkach, ktorá zahŕňa výstup teplého a vlhkého vzduchu a jeho kondenzáciu v rovníkovej brázde nízkeho atmosférického tlaku a jeho horizontálny transport až do subtropických oblastí, kde vo vysokom tlaku zostupuje k zemskému povrchu. Na Hadleyho bunku nadväzuje Ferrelova bunka v miernych zemepisných šírkach a na ňu polárna bunka.

Hemeróbia vegetácie Vyjadruje stupeň premeny pôvodnej vegetácie daného miesta v dôsledku aktivít človeka. Čím vyššia je táto premena, tým vyšší bude aj stupeň hemeróbie. Polárnym indikátorom k hemeróbii je pôvodnosť vegetácie, čím vyššia hemeróbia, tým nižšia pôvodnosť a naopak.

Hierarchia → ***Hierarchická organizácia***

Hierarchická organizácia Vzniká tým, že systémy hierarchicky nižších úrovní sa vnárajú, integrujú do systémov vyšších hierarchických úrovní (napr. jedince sa integrujú do populácií, populácie sa integrujú do spoločenstiev, atď.).

Historická krajinná štruktúra Reliktná, zväčša priestorovo obmedzená krajiná štruktúra, ktorá je pozostatkom ľudských aktivít v minulosti, ktoré sa aspoň v určitej miere podarilo zachovať.

Holarchia → ***Holarchická organizácia***

Holarchická organizácia Hierarchické usporiadanie, ktoré vzniká vnáraním, integráciou jednoduchších komponent (subsystémov) do zložitejších systémov, pričom sa zdôrazňujú aj recipročné vzťahy vzájomnej koordinácie medzi rôznymi hierarchickými úrovňami (teda aj pôsobenie „zdola nahor“).

Holizmus Filozofia celostnosti, podľa ktorej sú všetky komponenty celku vzájomne prepojené a bez tohto celku nemôžu existovať. To znamená, že aj ich poznanie si vyžaduje pochopenie celku systému, ktorý je vždy viac ako suma jeho prvkov.

Hollingov cyklus → ***Adaptívny vývojový cyklus***

Homeodynamika Integrácia koncepcie homeostázy a homeorhézy. Podobne ako pri homeostáze, autoregulačné mechanizmy udržiavajú relatívne konštantné vnútorné prostredie a funkčnosť daného systému aj v prípade, ak sa podmienky okolia, vonkajšieho prostredia systému zmenia. Rozdiel je v tom, že vnútorné konštanty, ku ktorých udržaniu autoregulačné mechanizmy smerujú, sa počas životnej dráhy menia.

Homeorhéza Vývoj organizmu alebo ekosystému v smere jeho prirodzenej vývojovej (životnej) dráhy resp. jeho tendencia sa v tejto dráhe pohybovať.

Homeostáza Udržiavanie relatívne konštantných podmienok vnútorného prostredia biologického, ekologického alebo socioekonomického systému aj napriek zmenám podmienok vonkajšieho prostredia.

Homeotermné (homoiotermné) živočíchy Vtáky a cicavce udržiavajú svoje teplotné optimum oxidáciou energeticky bohatých molekúl. S gradientom teploty medzi povrchom ich tela a teplotou vonkaj-

šieho prostredia sa vyrovnávajú sezónnymi zmenami izolácie na povrchu tela, zmenami veľkosti produkcie tepla alebo zbavovaním sa nadbytočného tepla prostredníctvom potenia sa a vyparovania potu.

Homeotické gény Kódujú tvorbu proteínov riadiacich rýchlosť prepisu genetickej informácie z DNA do RNA (tzv. transkripčné faktory), čím regulujú zapínanie a vypínanie génov tak, aby k vyjadreniu príslušného génu došlo vždy v správnom čase a v správnych bunkách, čím sa bunky diferencujú a špecializujú a formujú sa špecifické orgány organizmu.

Hornina Prírodná heterogénna zmes minerálov, niekedy aj organických látok alebo sopečného skla, z ktorých sa skladá pevná časť zemskej kôry. Podľa spôsobu vzniku sa horniny delia na vyvreté, sedimentárne a metamorfované. Okrem minerálneho zloženia sa odlišujú aj svojou textúrou a štruktúrou.

Hmota V širšom zmysle substancia, ktorá sa prejavuje ako látka alebo silové pole. V užšom zmysle látka, prejavujúca sa vo forme diskrétnych útvarov, ktoré majú nenulovú pokojovú hmotnosť a energiu a zaberajú určitý priestor.

Holón Označuje rozpoznateľný, kvázi-autonómny, organizačne pomerne uzavretý podcelok hierarchických biologických, ekologických alebo sociálnych systémov. Ide o autoorganizačnú a autoregulačnú entitu, systém pozostávajúci z prvkov a ich väzieb, pričom sám je iba funkčným prvkom vyššieho celku.

Hranice rastu / Limity rastu Varovanie pred tým, že zhruba v polovici 21. storočia dosiahneme ekologické limity ďalšieho rastu ľudskej populácie, ekonomiky a spotreby, ak nezmeníme súčasné trendy, ktoré vyplývalo z počítačových modelov tímu vedcov z Massachusets Institute of Technology (USA).

Hrubý domáci produkt (HDP) Ročná trhová hodnota všetkých produktov a služieb vyprodukovaných domácimi a zahraničnými firmami a organizáciami, realizovaná na území krajiny (príp. globálne, v tom prípade ide o globálny HDP).

Hybné sily krízy Priame fyzické a nepriame (fyzické, sociálne a kultúrno-hodnotové) príčiny krízy.

Hydrologický cyklus Biogeochemický cyklus, v ktorom voda neustále mení svoje skupenstvo, prostredníctvom zrážok sa distribuuje po zemskom povrchu, pričom sa obnovujú toky a zásobníky povrchovej a podpovrchovej vody, a súčasne sa prirodzenými mechanizmami čistí.

Hypotéza Gaia Podľa Jamesa Lovelocka a Lynn Margulis Zemský ekosystém funguje ako obrovský autoregulujúci sa kybernetický systém, ktorý sa prostredníctvom početných a rozmanitých spätných väzieb aktívne podieľa na optimalizácii podmienok potrebných pre život.

Chemický prvok Atómy s rovnakým atómovým číslom. Usporiadané sú v Mendelejevovej periodickej tabuľke. V roku 2019 bolo známych 118 rôznych chemických prvkov, z ktorých 98 sa vyskytuje v prírode.

Implikácia (v ekológii) Logický dôsledok určitého javu – jav A implikuje nejaký jav B, ak z A vyplýva B, resp. ak je B už nejakým spôsobom zahrnuté (implikované) v A. V praxi sa za implikáciu považuje aj logický dôsledok nejakého princípu, metódy, koncepcie alebo zákonitosti.

Index biologickej integrity Kvantifikácia stavu ekosystému (predovšetkým sladkovodného) na základe zisťovania výskytu indikačných druhov a ich synúzií.

Index živej planéty Indikátor úbytku veľkosti populácií stavovcov, z dielne WWF. Vychádza z dlhodobého sledovania 16 704 populácií zo 4 005 druhov stavovcov. V období 1970 – 2014 tento index v globálnom priemere klesol o 60 %, v neotropickej oblasti o 89 %, v prípade sladkovodných ekosystémov až o 83 %.

Indikácia Signalizácia určitého stavu systému, procesu alebo tendencie vývoja.

Indikátor Premenná, ktorej hodnota sa dá získať (alebo vypočítať) pomerne jednoducho a ktorá nás informuje o stave alebo atribúte daného systému, napr. environmentálny indikátor indikuje stav určitej zložky životného prostredia.

Infiltrácia Vsakovanie vody do pôdy a priepustných hornín, ktoré je dôležité pre dopĺňanie pôdnej vlahy a podzemných vôd.

Informácia V základnom vyjadrení označuje údaje o prvkoch, systémoch a ich prostrediach, v širšom zmysle aj šírenie (informovanie). Informáciou môže byť napr. obsah správy v médiách, popis vlastností

určitého prvku alebo systému alebo jeho štruktúry a funkcií, uverejnený vo vedeckom časopise, výpis údajov z databázy, sekvencia genómu organizmu, ale aj fotografie, mapy a pod. Na rozdiel od hmoty a energie informácia získava svoj zmysel až v spojení s inou informáciou, t.j. je vždy kontextuálna.

Infračervené žiarenie Elektromagnetické žiarenie vlnových dĺžok 760 nm – 1 mm, t.j. dlhších ako má viditeľné svetlo, ale kratších ako má mikrovlnné žiarenie. Predstavuje zhruba 50 % na zemský povrch dopadajúceho slnečného žiarenia.

Insolácia (oslnenie) Tok slnečnej energie, ktorá dopadá na osvetlený zemský povrch, udáva sa vo wattoch na jednotku povrchu, napr. $W.m^{-2}$ alebo v $MJ.m^{-2}$. Priemerná hodnota insolácie je 342 $W.m^{-2}$. Denná insolácia závisí od uhla dopadajúcich slnečných lúčov (najvyššia je pri uhle 90°) a od doby expozície. Ročná insolácia je najvyššia na rovníku, smerom k pólom klesá.

Integrita Celistvosť, úplnosť (neporušenosť), autenticita, kvalita aj reziliencia systému voči zmenám.

Integrovaná produkcia Produkcia zameriavajúca sa na dosiahnutie optimálnych (nie maximálnych) výnosov v poľnohospodárstve a vyššej kvality produktov cestou menšieho zaťažovania jednotlivých zložiek životného prostredia. Napr. v prípade ochrany rastlín neznamená úplné vylúčenie používania pesticídov, ale redukciu počtu ich aplikácií, čo kompenzuje posilňovaním biologického boja proti hospodárskym škodcom, t.j. na báze prirodzených autoregulačných mechanizmov ekosystémov.

Interakcia (medzi prvkami) Spočíva v tom, že zmena stavu jedného prvku spôsobuje zmenu stavu iného prvku. Jeden prvok teda ovplyvňuje druhý prvok, s ktorým je v interakcii.

Interakčný prvok Ekologicky významný krajinný prvok, ktorý nemusí mať vysokú biodiverzitu, ale má pozitívny ekostabilizačný vplyv na svoje okolie (napr. remízka na poli).

Intercepcia Zachytávanie vody na povrchu rastlín, časť zrážok, ktorá nestečie na povrch pôdy, ale spätne sa vyparí (alebo sublimuje) do atmosféry.

Interdisciplinárny Medziodborový, spájajúci dva a viac vedných odborov v jednej konkrétnej ľudskej aktivite, napr. vo vzdelávaní, výskumnom projekte, ochrane prírody a krajiny, posudzovaní vplyvov na životné prostredie.

Invázne druhy Nepôvodné druhy organizmov, ktoré sa na nové územie dostali neúmyselným zavlečením alebo introdukciou človekom, v tomto území sa spontánne a nekontrolovane šíria a vytláčajú pôvodné druhy rastlín, húb a živočíchov. Môžu ohrozovať ľudské zdravie a spôsobovať ekonomické a ekologické škody.

Invázne rastliny Nepôvodné druhy flóry, ktorých diaspóry sa často spontánne šíria na veľké vzdialenosti (k čomu prispieva najmä globálny obchod, doprava ľudí a zvierat, splanievanie zo záhrad) a nekontrolovane obsadzujú stále nové stanovištia. Spravidla v nich nemajú prirodzených nepriateľov a preto majú vysokú konkurenčnú schopnosť, čím vytláčajú z biotopov pôvodné druhy rastlín.

Invázne živočíchy Nepôvodné, človekom (úmyselne alebo neúmyselne) zavlečené alebo vysadené druhy, resp. nižšie taxóny živočíchov, ktoré majú potenciál sa rýchlo a nekontrolovateľne šíriť a negatívne ovplyvňovať populácie našich pôvodných druhov, pôvodné biotopy, resp. súvisiace ekosystémové služby.

Ióny Atómy alebo skupiny atómov s jedným alebo viacerými elektrickými nábojmi. Rozlišujú sa kladne nabité katióny a záporne nabité anióny.

Ireverzibilný proces Nevratný proces, napr. proces transformácie energie.

Izotopy Formy chemického prvku, ktoré majú rovnaké hmotnostné číslo (počet protónov v jadre), ale odlišujú sa počtom neutrónov v jadre.

Jadrová syntéza Reakcia fúzie aspoň dvoch atómových jadier, pri ktorej vznikajú nové atómové jadrá a subatómové častice a rozdiel v hmotnostiach reaktantov a produktov sa prejavuje uvoľňovaním alebo absorpciou energie.

Joule Jednotka práce a energie definovaná ako práca, ktorú koná sila veľkosti 1 N pôsobiaca po dráhe 1 m. Pre praktické účely sa používajú násobky energie 1 joule, napr. kilojoule (1 kJ = 1 000 J), megajoule

(1 MJ = 10^6 J), gigajoule (1GJ = 10^9 J) a terajoule (1 TJ = 10^{12} J).

Kaldera Kotlovitý sopečný kráter veľkých rozmerov, ktorý vznikol prepadnutím stien vulkánu po vyprázdnení jeho magmatického kozuba, prípadne dlhodobou denudáciou menej odolného materiálu v centrálnej časti už vyhasnutých sopiek. Najzachovalejšiu a súčasne najväčšiu kalderu na Slovensku uzatvára masív Poľany.

Kalória Jednotka energie, definovaná ako energia potrebná na zohriatie 1g vody zo 14,5 °C na 15,5 °C (merná tepelná kapacita vody totiž závisí od jej teploty). Štandardný prevod je 1 cal = 4,185 J, t.j. 1 J = 0,239 cal. V praxi sa podobne ako pri Joule používajú násobky tejto jednotky, najčastejšie kilokalória (1 kcal = 1 000 cal).

Karcinogén Chemická látka, patogén alebo energia (napr. ionizujúce žiarenie), ktoré môžu v organizme vyvolať rakovinové bujnenie.

Kinetická (pohybová) energia Vzťahuje sa k pohybu objektu v priestore a závisí od jeho hmotnosti a rýchlosti ($E = ½.m.v^2$). Príkladom je energia pohybujúcich sa elektrónov vo vodivom materiáli, energia tečúcej vody, morských vĺn, vetra alebo energia pohybujúcich sa vozidiel.

Kladná spätná väzba Taký spätnoväzobný okruh, v ktorom zmena na jeho počiatku po prechode okruhom vedie k posilneniu tejto zmeny. Kladné spätné väzby sú dôležité pre rast a vývoj organizmov, sukcesiu spoločenstiev, ale môžu viesť k nestabilite systému (zväčšovaním poruchy na jeho vstupe).

Klimatická zmena Zmena klimatického systému, ktorá vedie k dlhodobým zmenám vzorcov počasia, ktoré môžu trvať desaťročia, tisíce až milióny rokov. V geologickej histórii Zeme bolo takýchto zmien mnoho. Súčasná zmena klímy je výnimočná tým, že sa na nej výrazne podieľajú aktivity človeka (najmä spaľovanie fosílnych palív, odlesňovanie, rozorávanie lúk, chov hovädzieho dobytka), ktoré vedú k nárastu koncentrácie skleníkových plynov v atmosfére a k zmene energetickej bilancie Zeme.

Klimatický systém Zeme Jeden z kľúčových život udržujúcich systémov Zeme, ktorý poháňa kontinuálny prísun energie slnečného žiarenia, nerovnomerné oslnenie zemského povrchu a rotácia Zeme. Samotný systém je výsledkom synergie pôsobenia základných zložiek tohto systému, osobitne atmosféry, litosféry, pedosféry, hydrosféry, kryosféry a biosféry, ako aj ich vzájomných interakcií.

Klimax Vrcholné štádium sukcesie vegetácie. V klimaxe je spoločenstvo (až do príchodu disturbancie) relatívne stále, prevládajú druhy dobre adaptované na ekologické podmienky daného miesta a ekologická rezistencia aj reziliencia spoločenstva v tomto štádiu je najvyššia. Druhová diverzita však v dôsledku konkurenčného vylučovania sa druhov môže byť nižšia ako v predošlých štádiách. Spravidla sa pod týmto pojmom predstavuje klimatický klimax, ktorý reflektuje klimatické charakteristiky stanovišťa. O edafickom klimaxe hovoríme vtedy, ak je primárne determinovaný pôdnymi charakteristikami.

Kľúčový druh Druh, ktorý má napriek svojej menšej abundancii alebo menšej biomase kľúčový význam v ekosystéme vzhľadom k udržaniu jeho štruktúry, dynamiky a funkcií. Príkladmi kľúčových druhov sú vrcholové predátory, ďalej ekosystémoví inžinieri (napr. bobry a dážďovky), ale aj opeľovače. Vyhynutie kľúčového druhu môže spustiť kaskádu vymierania ďalších druhov.

Kmitanie → *Oscilácia*

Kompakcia pôdy → *Zhutnenie pôdy*

Komplexita → *Zložitosť*

Kompozícia Skladba, zostava alebo kreatívny proces, ktorým vzniká systém, zostavený z prvkov.

Kompozícia (v ekológii) Priestorová skladba prvkov v ekologickom systéme, napr. populácií druhov v spoločenstve, ekosystémov v krajine.

Koncepcia siete Vhodná grafická reprezentácia architektonickej štruktúry živého systému, ktorá zahŕňa 1) jednotlivé entity (prvky) systému, ktoré predstavujú uzly siete a 2) väzby medzi nimi, ktoré predstavujú spojenia medzi týmito uzlami. Zreťazenia jednotlivých interakcií medzi rôznymi prvkami siete vytvárajú procesy, ktoré dané prvky integrujú do koherentného a funkčného celku, systému.

Kondukcia tepla → *Vedenie tepla*

Konektivita Spojitosť, vzájomné prepojenie prvkov v priestore, napr. jedincov v populácii, miestnych populácií rovnakého druhu alebo rovnakých typov ekosystémov.

Konkurenčné vylúčenie Vylúčenie druhu zo spoločenstva v dôsledku tlaku konkurenčne silnejšieho druhu, ktorý neproporčne vysoko spotrebúva pre oba druhy dostupné prírodné zdroje.

Kontaminácia Znečisťovanie príslušnej abiotickej zložky životného prostredia (pôdy, vody, ozdušia) nežiaducimi, najmä toxickými látkami, ktoré majú nepriaznivé vplyvy na danú zložku, jej prostredníctvom aj na organizmy a ekosystémy alebo na ľudské zdravie.

Kontingencia Udalosť, jav alebo okolnosť, ktorá môže ale ani nemusí v budúcnosti nastať.

Kontrakcia Proces úbytku – zmenšovania, skracovania, zužovania, zmršťovania alebo sťahovania.

Konvekcia tepla → *Prúdenie tepla*

Konverzia Premena, zmena.

Konzervácia (v ekológii) Ochrana, efektívne využívanie a udržiavanie prírodných zdrojov.

Krajina Heterogénna časť zemského povrchu ktorú spravidla vytvára vzájomné pôsobenie prírodných prvkov aj ľudských výtvorov a aktivít. Vymedzená je podľa určitého kritéria. Ide o komplex ekosystémov, ktorých vzájomné vzťahy vytvára interakcia hornín, reliéfu, pôdy, vody, ovzdušia, rastlín, živočíchov a človeka. Každá krajina má svoju genézu, ktorá definuje jej jedinečné charakteristiky a osobitný vzhľad. Vzhľadom k rôznym formám a spôsobom jej využívania človekom sa rozlišuje lesná krajina, poľnohospodárska krajina (v rámci nej niekedy aj oráčinová krajina) a sídelná krajina, prípadne aj priemyselná krajina. Podľa stupňa antropogénnej premeny sa rozlišuje napr. prírodná krajina, prirodzená či kultúrna krajina.

Krajinná ekológia Interdisdicplinárny vedecký odbor, najmä na rozhraní geografie a ekológie, ktorý skúma a prognózuje vznik, vývoj a správanie sa územných jednotiek z hľadiska ich štruktúry a vzťahov jednotlivých krajinných prvkov, ale aj vzťahov medzi organizmami a ich prostredím v skúmanom území, a následne navrhuje ekologicky aj sociálnoekonomicky optimálnu priestorovú organizáciu územia.

Krajinná pokrývka Najvrchnejšia, viditeľná pokrývka krajinnej sféry, biofyzikálne objekty pokrývajúce časť zemského povrchu (napr. vegetácia, odkrytý substrát, zástavba, cestná a železničná sieť).

Krajinná štruktúra Súhrn všetkých krajinných prvkov a ich vzájomných väzieb – vertikálna, horizontálna a časová organizácia krajinného systému.

Kultúra (ľudská) Súhrn všetkých materiálnych aj nehmotných ľudských výtvorov a produktov, vrátane umenia a vedy, ako aj ľudského správania a etických systémov.

Kultúrna eutrofizácia Antropogénny proces nadmerného obohacovania vôd o živiny, ktorý vedie k premnoženiu planktónu a siníc a po ich odumretí, v dôsledku rozkladu detritu aerobnými baktériami, k výraznému úbytku kyslíka vo vode, čo vedie k úhynu rýb a ďalších sladkovodných organizmov.

Kultúrna krajina Krajina zmenená človekom, má rôzne podoby, napr. urbánna krajina, poľnohospodárska, lesná, rekreačná.

Kybernetika Veda zameraná na riadenie a komunikáciu v biologických, sociálnych a technických systémoch. Centrom jej záujmu sú otázky organizácie systémov a k tejto organizácii potrebné mechanizmy, napr. signály, spätné väzby, riadenie vnútorných procesov, udržiavanie dynamickej rovnováhy.

Kyslé atmosférické depozície Spád okysľujúcich zlúčenín z atmosféry na zemský povrch, zväčša vo forme kyslých dažďov obsahujúcih kyselinu sírovú (H_2SO_4) alebo kyselinu dusičnú (HNO_3), ktoré vznikajú reakciou oxidov síry a dusíka so vzdušnu vlhkosťou. Kyslé dažde sú však len jednou (vlhkou formou) týchto depozícií, ktoré zahŕňajú aj ďalšie zlúčeniny. Prekurzormi kyslých depozícií sú predovšetkým emisie oxidov síry a dusíka, ktoré môžu byť prenášané na vzdialenosti aj viac ako 1 000 km.

Litosféra Pevný vonkajší obal Zeme, ktorý zahŕňa zemskú kôru a najvrchnejšie časti zemského plášťa.

Vytvára pevnú platformu, podklad pre život, jej skaly nesú tenkú vrstvu pôdy, v ktorej sú živiny dostupné pre rastliny. Vrchná časť litosféry premenená pôsobením atmosféry, hydrosféry a pôsobením organizmov tvorí pedosféru, ďalšia časť trvale pokrytá snehom a ľadom tvorí kryosféru.

Malga Špecifický sociálno-ekologický systém v talianskej alpínskej provincii v údolí Ledro, ktorý spája ekosystémy alpínskych a subalpínskych lúk a otvorených horských riedkolesov s ich hospodárskym využívaním, najmä pastvou oviec, ale aj dobytka.

Manažment Riadenie resp. spravovanie organizácie, inštitúcie alebo prírodných zdrojov. V prípade chránených území sa pod ich manažmentom rozumie najmä ochrana biodiverzity a pôvodných procesov. Spadá sem bezzásahový manažment, ale tiež aktívne zásahy do ekosystémov (napr. kosenie lúk, odstraňovanie náletu), ako aj ich obnova (napr. obnova hydrologického režimu mokrade).

Mapovanie ekosystémových služieb Mapovanie ekosystémov v reálnej krajine spojené s hodnotením nimi poskytovaných ekosystémových služieb.

Mechanistický svetonázor Predstava, že prírode možno plne porozumieť pomocou analógie s fungovaním hodinového stroja.

Mikroorganizmus Organizmus, ktorý kvôli jeho miniatúrnej veľkosti môžeme vidieť iba pod mikroskopom.

Mikropolutant Znečisťujúca látka, ktorá je toxická už v nízkych koncentráciách. Prevažne sa k nim zaraďujú syntetické chemické látky, ale môžu byť aj prírodného pôvodu (napr. toxíny zo siníc).

Minerál Homogénna prírodná substancia, ktorá sa vyznačuje určitým chemickým zložením, často s vysoko usporiadanou molekulárnou štruktúrou, ktorá je v tuhom skupenstve za bežných podmienok kryštalická. Minerály v horninách sa členia na horninotvorné a akcesorické.

Mineralizácia ekompozícia a premena neživej organickej hmoty (detritu) na minerálne látky.

Modelovanie Vytváranie fyzických, matematických, grafických alebo logických reprezentácií reálneho systému (technického, sociálneho, ekonomického, biologického alebo ekologického), v ktorom prvky modelu a ich spojenia reprezentujú komponenty tohto systému a ich interakcie. Model umožňuje simulovať správanie sa reálneho systému za účelom jeho poznávania, prognózovania vývoja a manažmentu.

Molekula Kombinácia dvoch alebo viacerých atómov rovnakého chemického prvku alebo niekoľkých chemických prvkov, ktoré sú udržiavané spolu chemickými väzbami.

Monitoring ekosystémov Systém pravidelného zberu a vyhodnocovania údajov týkajúcich sa napr. populačnej dynamiky cieľových a ohrozených druhov, primárnej produkcie alebo iných vlastností ekosystému, najmä jeho druhovej diverzity a druhovej skladby. Takto získané informácie slúžia najmä rozhodovacej sfére, ale súčasne prispievajú k environmentálnej osvete, informovanosti a vzdelávaniu verejnosti.

Mulčovanie Pokrytie povrchu pôdy okolo pestovaných okrasných alebo úžitkových rastlín organickým materiálom (napr. opadaného lístia, kôry stromov, z kosby travinného porastu, pokrytie povrchu geotextíliou) alebo plastovou fóliou, ktoré bráni prerastaniu iných rastlín (zväčša burín), chráni pôdu pred eróziou, pomáha udržiavať vlhkosť a zvyšovať mikrobiálnu aktivitu v pôde.

Mutagén Chemická látka, patogén alebo energia (napr. ionizujúce žiarenie), ktoré môžu viesť k mutáciám v DNA génov a tým k nepriaznivým dedičným zmenám organizmu.

Mutualizmus Vzájomne prospešný vzťah medzi aspoň dvoma druhmi organizmov, ktoré sú vo vzájomnom fyzickom kontakte a prešli úzkym spoločným koevolučným vývojom (napr. vzťah medzi kvitnúcimi rastlinami a ich opeľovačmi, mykoríza medzi koreňmi rastlín a húb, spolužitie morských sasaniek a rybiek rodu *Amhiprion*).

Nanomateriál Materiál vytvorený z mimoriadne malých čiastočiek, ktorých veľkosť sa pohybuje medzi 1 až 100 nm.

Nelineárne správanie živých systémov Správanie, ktoré sa nemení lineárne, pričom zdrojom nelinearity je práve vysoká zložitosť systémov, vrátane synergie procesov a početných spätných väzieb.

Neobnoviteľné zdroje Materiálové alebo energetické prírodné zdroje, ktoré sa obnovujú iba v priebehu dlhých geologických období a preto z pohľadu merítka civilizácie zásoby týchto zdrojov čerpaním ubúdajú. Patria sem fosílne palivá, kovové minerály, nekovové minerály a horniny.

Neolitická poľnohospodárska revolúcia Prechod od kočovného života lovcov-zberačov k prvým poľnohospodárskym spoločenstvám (začal približne pred 12 000 rokmi).

Nepôvodné (alochtónne) druhy Druhy organizmov, ktoré boli do územia neúmyselne zavlečené alebo úmyselne introdukované človekom alebo sa doň spontánne rozšírili z iného územia v dôsledku vplyvov človeka (napr. v dôsledku klimatickej zmeny, ktorá vedie aj k zmenám ich areálov).

Nerovnovážna perspektíva Podľa paleontologických výskumov rovnovážny stav v ekosystémoch je skôr vzácny, stabilné, nemeniace sa ekosystémy v prírode prakticky neexistujú. Paradigma ekológie sa preto v súčasnosti mení a namiesto stability sa zdôrazňuje zložitosť, dynamika a nelineárne správanie ekologických systémov. V tejto súvislosti je novým cieľom manažmentu chránených území udržať alebo obnoviť ich ekologickú integritu prostredníctvom posilnenia prirodzenej štruktúry spoločenstiev a prirodzených biologických a ekologických procesov v ekosystémoch a krajine.

Nerovnovážna termodynamika živých systémov Ekologický (aj biologický) systém existuje v stave termodynamickej nerovnováhy s jeho prostredím, do ktorého ho vychyľuje prísun energie do systému. Aby sa s takto vzniknutým energetickým gradientom vyrovnal, musí túto energiu premeniť a disipovať na energiu nižšej kvality. Za týmto účelom spontánne vytvára disipatívne štruktúry a disipatívne procesy, ktorými súčasne zvyšuje svoju vnútornú organizáciu, v ktorej sa časť kvalitnej energie aj uchováva. Čím je vyšší prísun energie, tým systém buduje zložitejšiu organizáciu, v ktorej dokáže uchovávať viac kvalitnej energie. Zvyšnú časť transformovanej energie disipuje do prostredia, najmä v podobe tepla.

Neutrón Subatómová častica bez elektrického náboja, ktorá má relatívnu hmotnosť 1. Neutróny spolu s protónmi vytvárajú jadrá atómov.

Nitrifikácia Proces oxidácie amoniaku (NH_3 resp. NH_4^+), najprv na dusitany (NO_2^-) a v druhom kroku na dusičnany (NO_3^-).

Noosféra Sféra ľudského rozumu, ktorý pretvára biosféru (DUVIGNEAUD 1988). Chápe sa pod ňou ľudská spoločnosť a jej výtvory, aj ľuďmi premenená časť biosféry.

Norma (normatív) Pre spoločnosť záväzné pravidlo alebo skupina pravidiel, najmä v podobe zákonnej normy alebo predpisu.

Núdza o vodu Nastáva, ak priemerná dostupnosť vody na osobu ročne je nižšia ako 1 000 m^3, v prípade ak je táto dostupnosť nižšia ako 1 700 m^3, hovoríme o vodnom strese.

Obehová ekonomika Uzavretý ekonomický systém smerujúci k eliminácii odpadov a ku kontinuálnemu využívaniu prírodných zdrojov prostredníctvom opakovaného používania, opravovania a recyklovania produktov, ich komponentov a materiálov.

Obnoviteľné zdroje Trvalo alebo potenciálne obnoviteľné (vyčerpateľné) materiálové a energetické prírodné zdroje, ktoré sú obnoviteľné v primeranej dobe. Intenzita a rýchlosť čerpania týchto zdrojov by nemali presiahnuť prirodzené možnosti ich obnovy, v opačnom prípade dochádza k ich degradácii.

Odpadové teplo Teplo, ktoré organizmy na každej trofickej úrovni emitujú do prostredia v dôsledku transformácií energie v rámci ich metabolizmu, ide o export entropie za hranice živého systému.

Ohrozené druhy Druhy organizmov ohrozené vyhynutím vo voľnej prírode v dôsledku: a) veľkého pozorovaného alebo odhadovaného poklesu populácie alebo b) majúce malý areál a súčasne fragmentovaný výskyt alebo c) majúce veľmi malú populáciu, v kombinácii s fragmentáciou a poklesom populácie alebo d) majúce extrémne malú populáciu alebo e) pri ktorých kvantitatívne analýzy indikujú pomerne vysokú pravdepodobnosť ich vyhynutia v priebehu veľmi krátkeho obdobia alebo niekoľkých generácií. Ohrozené druhy sa klasifikujú do troch kategórií: kriticky ohrozené (CR – *critically threatened*), ohrozené (EN – *endangered*) a zraniteľné (VU – *vulnerable*). V červenom zozname sa rozlišuje aj kategória takmer ohrozený druh (NT – *near threatened*).

Ontická otvorenosť živých systémov Vysoká miera neurčitosti vývoja a správania zložitých biologických a ekologických systémov, ktorá súčasne limituje možnosti prognózovať ich vývoj.

Ontogenéza (vývin jedinca) Individuálny vývin organizmu od oplodneného vajíčka (pri partenogenéze bez oplodnenia) až po smrť. Zahŕňa obdobie zárodočného vývinu, rastu, dospievania, rozmnožovania, starostlivosti o potomstvo a starnutia.

Organely Priestorovo rozlíšené fyzické štruktúry v cytoplazme bunky, z ktorých každá má špecifickú funkciu.

Organické poľnohospodárstvo Systém produkcie nutrične kvalitných a ľudské zdravie neohrozujúcich potravín, ktorý významne znižuje a mení vstupy do produkčného procesu, chráni pôdu, vodu, ovzdušie a biodiverzitu. Využíva a podporuje prirodzené biologické a ekologické procesy v ekosystémoch poľnohospodárskej krajiny, vylúčené je používanie agrochemikálií aj geneticky modifikovaných organizmov.

Organizačné princípy života Organizačné charakteristiky spoločné pre všetky úrovne organizácie živých systémov.

Organizmus Ďalej nedeliteľná živá entita, indivíduum schopné samostatnej existencie, ktoré je tvorené jednou, viacerými alebo mnohými bunkami a je odlíšiteľné od iných indivíduí. Zložité organizmy charakterizuje vyššia rozmanitosť, hierarchická štruktúra a prepojenosť ich buniek, pletív alebo tkanív, orgánov a ich sústav.

Organické zlúčeniny Zlúčeniny tvorené atómami uhlíka v kombinácii s atómami jedného alebo viacerých iných prvkov, najmä vodíka (H) a kyslíka (O), ale aj dusíka (N), fosforu (P), síry (S), chlóru (Cl), fluóru (F) a ďalších.

Oscilácia Rytmická zmena určitej veličiny opakujúca sa v čase. Oscilácie sa netýkajú iba mechaniky, ale všetkých dynamických systémov (napr. oscilácie veľkosti populácií koristi a jej predátorov).

Oxymoron Rozporný pojem, spojenie protirečiacich si slov, zväčša podstatného a prídavného mena, v jednom tvrdení (napr. múdry hlupák).

Ozónová vrstva Vrstva plynného ozónu (O_3) nachádzajúca sa v stratosfére, ktorá filtruje pre organizmy nebezpečné UV žiarenie (osobitne UV-B) a tým chráni život na Zemi.

Panarchia Model vnárania sa, integrácie adaptívnych vývojových cyklov nižších úrovní (napr. života a reprodukcie jednotlivých stromov v lese) do hierarchicky vyšších vývojových cyklov (napr. lesného celku). Panarchia vysvetľuje význam dynamiky systémov nižších hierarchických úrovní pre udržanie ekologickej rovnováhy a stability hierarchicky vyšších úrovní.

Paradigma Sústava axióm, koncepcií, metodík a teórií všeobecne prijímaných vedeckou obcou, ktorá vytvára základný rámec definovania problémov, vedeckého výskumu a hľadania riešení.

Participatívny prístup (v ochrane prírody) Spočíva v tom, že rozmanité v chránenom území zainteresované a dotknuté skupiny (napr. orgány štátnej správy a samosprávy, podnikatelia, mimovládne a iné organizácie aj samotní miestni obyvatelia) sa aktívne zapájajú do prípravy a posudzovania dokumentácie chráneného územia, príp. sa podieľajú aj na realizácii starostlivosti o územie a na jeho ochrane.

Pesticídy Súborné označenie pre chemické látky (zväčša syntetické) používané s cieľom zabíjania určitých druhov živých organizmov. Rozlišujú sa najmä herbicídy (látky na ničenie burín), fungicídy (proti hubovým patogénom), insekticídy (na ničenie hmyzu), agaricídy (proti roztočom), nematocídy (proti háďatkám), molluskocídy (na ničenie mäkkýšov) a rodenticídy (na ničenie hlodavcov).

Planetárne hranice (v ekológii) Ekologické limity na planetárnej úrovni, udržateľná spoločnosť musí existovať v hraniciach ekologickej únosnosti život udržiavajúcich systémov Zeme. Navrhnuté planetárne hranice bezpečia ľudských aktivít predstavujú prahy, po prekročení ktorých vstupujeme do oblasti rizika náhlych a pre civilizáciu nepriaznivých zmien život udržiavajúcich systémov aj celku Zemského systému.

Pletivo Mnohobunková štruktúra špecializovaných buniek rastlín a húb, ktoré sú organizované takým spôsobom aby mohli v jedincovi vykonávať určitú hlavnú spoločnú funkciu.

Pluralistický Zahŕňajúci viaceré a rozmanité, neraz aj protichodné názory a postoje.

Plynúca ekologická rovnováha Metafora vyjadrenia ekologickej integrity ekologického systému, ktorej súčasťou je jeho vysoká dynamika a prakticky neustála zmena.

Počasie Aktuálny stav atmosférických javov nad určitým konkrétnym miestom, ktorý sa popisuje súborom meteorologických prvkov, ako sú najmä teplota, atmosférický tlak, relatívna vlhkosť vzduchu, oblačnosť, rýchlosť a smer vetra, zrážky.

Počiatočné podmienky Hodnoty dôležitých premenných systému na začiatku jeho vývoja (v čase t = 0), ktoré zásadne ovplyvňujú vývoj systému (ich zmena by mohla viesť k úplne odlišnému vývoju systému).

Podnebie Dlhodobý prevažujúci charakter počasia na určitom mieste alebo v regióne, ktorý vychádza zo štatistík meteorologických pozorovaní (štandardne 30 rokov). Ide o dlhodobé štatistické priemery meteorologických premenných, aj ich odchýlky a strmosť trendových kriviek, ktorá vyjadruje dynamiku zmien.

Podnebné (klimatické) pásma Zhruba rovnobežníkové široké pásma Zeme, ktoré charakterizujú rovnaké základné vlastnosti klímy, to znamená približne rovnaký charakter makroklímy. Tieto pásma závisia od oslnenia zemského povrchu a od globálnej cirkulácie atmosféry.

Podzemná voda Voda viazaná v horninovom materiáli, ktorý obsahuje póry alebo pukliny, ktorými vodu absorbuje a môže ju aj viesť. Takáto voda sa nachádza napr. v štrkoch, štrkopieskoch, pieskovcoch, zlepencoch, vápencoch, dolomitoch a ďalších horninách.

Poikilotermné živočíchy Vyznačujú sa vysokou teplotnou vodivosťou medzi ich telom a prostredím. Ich telesná teplota sa preto pomerne rýchlo mení v závislosti od teploty ich vonkajšieho prostredia. V dôsledku toho svoje fyziologické a rastové procesy regulujú zmenou rýchlosti enzymatických procesov.

Pokorný antropocentrizmus Antropocentrický postoj a svetonázor, ktorý sa súčasne vyznačuje bázňou a rešpektom voči mimoľudskej prírode a je si vedomý limitov jej antropogénnych zmien. Človeka má viesť k úcte voči všetkému životu a k zodpovednosti, ktorú nemožno delegovať na rastliny ani živočíchy.

Polarita Vzťah medzi dvomi protichodnými hodnotami určitej veličiny alebo medzi dvomi protichodnými vlastnosťami, procesmi alebo princípmi (napr. kladný a záporný elektrický náboj, svetlo a tma). Z pohľadu teórie zložitosti sa protikladné procesy zjednocujú na hierarchicky vyššej úrovni systému.

Populácia Skupina jedincov rovnakého druhu, ktorí v rovnakom čase obývajú určitý spoločný priestor.

Poškodzovanie stratosférickej ozónovej vrstvy Pokles koncentrácie ozónu v stratosfére v dôsledku syntetických chemikálií, ktoré za dlhé roky vystúpili do stratosféry, kde sa z nich pôsobením UV žiarenia uvoľnujú plyny Cl, ClO, Br a BrO, ktoré katalyticky rozkladajú ozón. V súčasnosti sa už v dôsledku prísnych regulácií týchto chemikálií ozónová vrstva zotavuje.

Potenciálna (polohová) energia V objekte uchovaná energia, ktorá je potenciálne využiteľná. Závisí od polohy telesa v dosahu pôsobenia vonkajšej sily, napr. gravitačnej, elektrickej, sily magnetickej príťažlivosti.

Potravový (trofický) reťazec Určitý rad vzájomne spolu energetickými tokmi a transformáciami zviazaných jedincov, populácií, druhov alebo ekologických gíld. Rozlišuje sa predovšetkým pastevno-koristnícky, parazitický a dekompozičný (detritový) potravový reťazec.

Povrchová voda Pôvodne zrážková voda a podzemná voda vyvierajúca na povrch, ktorá sa neinfiltrovala do pôdy a hornín ani sa nevyparila zo zemského povrchu. Po tomto povrchu odteká vo forme plošného ronu, vodných tokov a vodných kanálov. Povrchová je aj voda jazier, vodných nádrží, mokradí a rybníkov.

Pôda Abiotická zložka ekosystému, zmes minerálov, rozkladajúcej sa organickej hmoty, vody s rozpustenými látkami, plynov a živých organizmov, ktorá podporuje rast rastlín. Pôdotvorný proces je výsledkom pôsobenia klímy, reliéfu, materskej horniny, procesov zvetrávania a erózie a pôsobenia živých organizmov. Ide o dôležitú súčasť život udržiavajúcich systémov obehu látok v prírode.

Prediktor Premenná, na základe ktorej je možné predvídať zmeny hodnôt iných premenných (napr. priemerná ročná teplota vzduchu a priemerné zrážky indikujú charakter vegetácie daného územia).

Priemyselná revolúcia Proces prechodu od manufaktúrnej výroby (založenej na ručnej práci), ku továrenskej výrobe (založenej na strojovej výrobe). Rozvoj masovej výroby a nových techhnológií, ktorý

umožnili nové technické objavy a je spojený s intenzívnym využívaním zásob energie fosílnych palív a nerastných surovín získavaných zo zemskej kôry. Začal prebiehať v druhej polovici 18. storočia.

Priestorová heterogenita Rozmanitosť a usporiadanosť prvkov v priestore, napr. jedincov v populácii, druhov v spoločenstve alebo ekosystémov v krajine.

Primárna produktivita (hrubá) Rýchlosť s akou primárni producenti ekosystému zachytávajú slnečnú energiu a transformujú ju na chemickú energiu biomasy za určitú časovú jednotku. Čistú primárnu produktivitu získame ak od hrubej primárnej produktivity odrátame rýchlosť s akou primárni producenti využívajú časť hrubej primárnej produkcie prostredníctvom bunkového dýchania (respirácie).

Primárne ekologické limity Ekologické limity určené nosnou ekologickou vrstvou v modeli udržateľného sociálno-ekologického systému, ktoré sú nevyhnutné pre existenciu ľudskej civilizácie. Ich nerešpektovanie znižuje ekologickú integritu ekosystémov, krajín aj Zemského systému. Fungovanie ekologickej vrstvy je podmienkou existencie všetkých ďalších vrstiev, sociálnej, ekonomickej aj kultúrnej.

Primárne sociálne limity Sociálne limity určené sociálnou vrstvou v modeli udržateľného sociálno-ekologického systému, ktorými sú najmä zabezpečenie živobytia, bezpečia a zdravia, sociálnej spravodlivosti, solidarita a rešpektovanie dôstojnosti každého človeka. Nerešpektovanie týchto limitov oslabuje ľudskú integritu jednotlivcov a sociálnu integritu spoločnosti.

Primárni konzumenti Heterotrofné organizmy, ktoré produkujú biomasu konzumáciou primárnych producentov.

Primárni producenti Autotrofné organizmy, ktoré produkujú biomasu a) z anorganických zlúčenín transformáciou slnečnej energie (fotosynteticky aktívne zelené rastliny v suchozemskom prostredí, alebo rôzne druhy rias a siníc (cyanobaktérií) vo vodnom prostredí) alebo b) z chemickej energie (chemoautotrofné baktérie v podzemných priestoroch a vodných hlbinách, archey v blízkosti hydrotermálnych prieduchov v oceánoch, ktoré využívajú energiu chemických väzieb). Primárni producenti predstavujú v ekosystéme najnižšiu potravovú (trofickú) úroveň.

Princíp maximálneho výkonu Tendencia živého systému smerovať v k maximálnemu využitiu a súčasne k maximálnej disipácii dostupnej voľnej energie a ďalších prírodných zdrojov prostredníctvom zvyšovania zložitosti svojho usporiadania.

Princíp maximálnej produkcie entropie Analogický princíp k princípu maximálneho výkonu, v ktorom sa zdôrazňuje tendencia zvyšovania produkcie entropie pri vývoji živého systému.

Príroda V starovekom ponímaní tento pojem označoval zrodenie, rast, zmenu a vývoj, ale tiež vnútornú povahu prejavu života, prirodzenosť. V modernom ponímaní označuje hmotnú skutočnosť, objekty, vzťahy, procesy a systémy živého a neživého sveta, ktoré nevytvoril človek.

Príroda neživá, anorganická Všetka neživá hmota a energia vesmíru, z objektov na Zemi sem patrí reliéf, horniny, pôda, voda, ovzdušie a klíma, ale tiež geotermálna energia, energia prílivu a odlivu, slnečná energia a jej transformácie.

Príroda živá, organická Živé organizmy – mikroorganizmy, huby, rastliny a živočíchy, a ich systémy organizované do ekologických komplexov rôznych zložitostí a hierarchií: najmä populácií a spoločenstiev.

Prírodná disturbancia Náhle a dočasné narušenie spoločenstva alebo ekosystému prírodnými procesmi ako sú napr. víchrice a s nimi spojené polomy v lesoch, povodne, dlhotrvajúce suchá, požiare.

Prírodná katastrofa Prírodná disturbancia mimoriadnych rozmerov, ktorá vzniká rýchlymi pohybmi hmoty a tokmi energie alebo gradáciou populácií biologických „škodcov“ (v Severnej Afrike napr. saranče sťahovavej), a ktorá ohrozuje ľudské zdravie alebo životy alebo poškodzuje ekosystémy a majetok.

Prírodná krajina Vznikla prírodnými procesmi, s minimálnymi až žiadnymi vplyvmi človeka, často sa nazýva aj divočina.

Prírodné prostredie Označuje tú časť životného prostredia, ktoré pozostáva len z prírodných prvkov, prírodnín (v súčasnosti je však už na veľkej rozlohe zemského povrchu poznamenané vplyvmi človeka).

Prírodné riziko Potenciál vzniku prírodného javu, ktorý má nepriaznivé následky na ľudskú spoločnosť alebo ekosystémy (napr. riziko zosuvu pôdy alebo horniny na strmom svahu).

Prírodný kapitál Všetky biologické a ekologické fyzické štruktúry – krajina, horniny, minerály a pôda, voda, ovzdušie, ekosystémy, biodiverzita a všetky fyzikálne, chemické, biologické a ekologické procesy, ktoré sa na týchto štruktúrach realizujú. Synergia pôsobenia biofyzikálnych štruktúr a procesov vedie ku generovaniu ekosystémových funkcií a tým aj ekosystémových služieb, od ktorých závisí existencia aj prosperita ľudstva.

Prírodný zdroj Súčasť prírody, ktorú človek využíva alebo môže využiť ako materiálový či energetický zdroj na plnenie svojich potrieb a záujmov, v rámci existujúcich technických a socio-ekonomických podmienok. Členia sa na trvale obnoviteľné, obnoviteľné ale vyčerpateľné (degradovateľné) a na neobnoviteľné zdroje (minerály, horniny a fosílne palivá). Nie tak dávno k nim pribudli aj dva nehmotné zdroje: priestor a poloha.

Proces Zreťazenie interakcií medzi prvkami systému v čase a priestore, vytvárajúce kauzálne postupnosti udalostí.

Produkčné optimum (dreviny) Maximálna produkcia biomasy dreviny, ktorú dosahuje v najvhodnejšom súbore ekologických faktorov, vrátane konkurencie (kompetície) iných drevín. Tento súbor faktorov umožňuje tiež úplný životný cyklus danej dreviny. Produkčné optimá drevín sa nemusia kryť s ich dominantným postavením vo vegetačných stupňoch, napr. dub zimný dosahuje najvyššiu kvalitu a produkciu v 3. (dubovo-bukovom) vegetačnom stupni, v ktorom v prírodných lesoch prevláda buk lesný.

Program rozvoja vidieka (PRV) Operačný program Ministerstva pôdohospodárstva a rozvoja vidieka SR, zameraný na socioekonomický rozvoj vidieka a na ochranu životného prostredia pri poľnohospodárskej činnosti (osobitne pôdy, vody a biodiverzity) ako aj jej adaptácie na klimatickú zmenu. Program je schvaľovaný Európskou komisiou vždy na určité obdobie, súčasný PRV bol schválený na roky 2014 – 2020.

Prokaryotická bunka Bunka jednobunkových organizmov, ktorá nemá odlíšené jadro, jej organely nie sú oddelené membránami a viaceré typy organel eukaryotických buniek chýbajú (napr. mitochondrie).

Protón Subatómová častica s jedným kladným elektrickým nábojom a s relatívnou hmotnosťou 1. Protóny spolu s neutrónmi vytvárajú jadrá atómov.

Prúdiaca mozaika biotopov Metafora vystihujúca dynamiku prírody: v prírodnej (a do istej miery aj v poloprírodnej krajine) mozaika biotopov nie je stála, ale viac-menej sa plynulo mení.

Prvok systému Základná identifikovateľná entita, z pohľadu zvolenej hierarchickej úrovne nedeliteľná – napr. organela v bunke, tkanivo v orgáne, populácia organizmu v ekosystéme, topický ekosystém v krajine.

Prvý termodynamický zákon Je adaptáciou zákona o zachovaní energie pre termodynamické procesy. Pri žiadnych fyzikálnych a chemických procesoch energia nemôže vznikať ani zanikať, iba sa môže meniť z jednej formy na inú. Veľkosť tejto zmeny je určená tokom tepla a vykonanej práce podľa rovnice $\Delta U = Q - W$, kde ΔU je zmena vnútornej energie (U) systému, Q je zvonka dodané teplo a W je práca vykonaná systémom. Táto rovnica neplatí v prípade jadrových reakcií, pri ktorých sa na energiu mení malá časť hmoty.

Prúdenie tepla (konvekcia tepla) Šírenie tepla v kvapalinách a plynoch premiestňovaním častíc s väčšou energiou (napr. vody v atmosfére).

Pyramída biomasy Schematické vyjadrenie biomasy (a tým aj energie) na jednotlivých trofických úrovniach ekosystému. Najčastejšie sa vyjadruje v kalóriách na jednotku plochy alebo objemu.

Radiačná bilancia ekosystému Rozdiel množstva žiarenia prijatého a vyžiareného ekosystémom.

Rázové vlny Vlny šíriace sa pevným, kvapalným lebo plynným médiom, nesúce energiu, ktoré sa vyznačujú prudkými zmenami prostredia, napr. prudkým rastom tlaku, teploty a hustoty daného média.

Recyklácia Proces spracovania a opätovného (alebo nového) využitia už použitých materiálov.

Redukcionistický prístup Spočíva v dekompozícii celku na jeho fragmenty, tie sa skúmajú oddelene a získané výsledky sa zlučujú. Tento analytický prístup je pre rozvoj poznania dôležitý, avšak zo zlučovania poznatkov o prvkoch zložitých systémov nezískame obraz týchto systémov ako funkčných integrovaných celkov.

Reliktné žiarenie Kozmické mikrovlnné žiarenie, ktoré je pozostakom z obdobia krátko po Veľkom tresku a ktorého existenciu teória Veľkého tresku predpokladala.

Reorganizácia Zmena predošlej organizácie systému alebo jej inovatívna obnova.

Retencia Zadržiavanie, v hydrológii a ekológii znamená schopnosť ekosystémov a krajiny zadržiavať vodu.

Revízia Opätovné prehliadnutie (kontrola), napr. revízia elektrických zariadení, ale aj revízia poznania, napr. revízia histórie, tiež revízia vedeckých koncepcií v dôsledku nových poznatkov.

Reziliencia (ekologická) → *Ekologická pružnosť*

Rezistencia (ekologická) → *Ekologická odolnosť*

Ron Rozptýlený odtok vody po povrchu terénu, ku ktorému dochádza najmä po zrážkach.

Rozkladače (dekompozítory) Organizmy, ktoré v detritových trofických reťazcoch dokážu tráviť a tým rozkladať neživú organickú hmotu na jednoduchšie látky. Patria sem najmä baktérie a huby, ale tiež detritom a exkrementami sa živiace živočíchy.

Rozmery zložitosti Pomyselné osi, pozdĺž ktorých sa mení zložitosť fyzickej štruktúry systému, zložitosť jeho funkcií a správania a súčasne zložitosť dynamiky systému (časový rozmer).

Rytmus Pravidelné opakovanie cyklu striedania udalostí (napr. srdcový rytmus, dýchanie, cirkadiálny rytmus, striedanie ročných období).

Salinizácia pôdy → *Zasoľovanie pôdy*

Sálanie tepla (radiácia) Emitovanie elektromagnetického žiarenia, ktoré je spôsobené teplotou objektu. Takto vyžarovaná energia závisí od teploty telesa, od farby jeho povrchu (čím je povrch tmavší a teplejší, tým je vyžarovanie vyššie) a rastie aj úmerne s rastom plochy povrchu.

Sebaobnova Spontánna obnova organizmu, populácie, spoločenstva alebo ekosystému, s využitím jeho vlastných autoorganizačných a autoregulačných procesov a mechanizmov.

Sebecké gény Podľa génocentrickej teórie jedinými rozhodujúcimi aktérmi evolúcie sú tzv. „*sebecké gény*“, ktoré akoby sledovali výlučne iba svoj záujem, a tým riadili organizmy k vopred determinovanému správaniu. Podľa tejto teórie je jediným zmyslom existencie organizmov zachovanie ich génov.

Sedimenty Usadeniny zložené z častíc pevných látok, ktoré sa usadili na dne priestoru vyplneného plynom (napr. veterné sedimenty) alebo kvapalinou (napr. riečne, jazerné a morské sedimenty).

Sekundárni konzumenti Heterotrofné organizmy, ktoré produkujú biomasu konzumáciou primárnych konzumentov.

Siete Prostredníctvom interakcií prepájajú a integrujú prvky systému do dynamického a funkčného celku.

Skalár (skalárna veličina) Veličina, ktorá je vo vzťahu k zvolenej jednotke úplne určená jediným číselným údajom, napríklad výška stromu 20 m, teplota vzduchu 18 °C, hmotnosť ovce 70 kg.

Skleníkový efekt Prírodný jav, ktorý udržiava teplotu atmosféry pri zemskom povrchu zhruba o 33 °C vyššiu (na úrovni približne + 15 °C, ak by sme nezohľadnili súčasné globálne otepľovanie), než aká by bola bez neho. Jeho podstatou je zachytávanie dlhovlnného žiarenia, emitovaného zemským povrchom, skleníkovými plynmi atmosféry, ktoré následne časť tohto žiarenia vracajú späť k zemskému povrchu.

Skleníkové plyny lyny nachádzajúce sa v atmosfére Zeme, ktoré zachytávajú zemským povrchom emitované dlhovlnné žiarenie a následne jeho časť vracajú späť k zemskému povrchu. Najvýznamnejšími skleníkovými plynmi sú vodná para, oxid uhličitý (CO_2), metán (CH_4), oxid dusný (N_2O), ozón (O_3), chlórfluórované uhľovodíky a fluorid sírový (SF_6).

Skupenské teplo (latentné teplo) Teplo, ktoré je potrebné látke dodať alebo odobrať na to aby sa zmenilo jej skupenstvo, t. j. aby daná látka prešla z jednej fázy do inej (napr. teplo potrebné dodať na topenie ľadu alebo vyparovanie vody resp., ktoré je potrebné odobrať napr. pri tvorbe ľadu na jazere).

Slanisko Špecifický typ mokrade, ktorú charakterizuje vysoký obsah solí v pôde aj vo vode a výskyt halofytných (slanomilných) druhov rastlín.

Slnečná energia Energia vznikajúca vnútri Slnka, v dôsledku termonukleárnych reakcií (pri teplote plynov dosahujúcej 15 miliónov °C), pri ktorých dochádza k syntéze ľahšieho vodíka na ťažšie hélium. Slnko emituje energiu vo forme elektromagnetického žiarenia a táto energia sa považuje za trvalo obnoviteľný zdroj.

Sociálna asymetria Nerovnováha v príjmoch, majetku a postavení rôznych vrstiev spoločnosti.

Sociálna integrita Miera prirodzenosti a funkčnosti usporiadania spoločnosti a jej reziliencie voči tlakom zvonku spoločnosti. Podmienkou sociálnej integrity je rešpektovanie a uplatňovanie hodnôt a etických noriem, požiadaviek a pravidiel, ktoré spájajú jednotlivcov v ľudskej komunite.

Sociálno-ekologický systém Systém, ktorý pozostáva z prírodných komponentov (biofyzikálna časť) a z ľudí, ich aktivít, výtvorov a inštitúcií. Definovaný môže byť na rôznych hierarchických úrovniach, napr. od obce a jej prostredia v hraniciach katastra, až po najvyšší Zemský sociálno-ekologický systém.

SOHO systémy Koncepcia samoorganizujúcich sa holarchických otvorených systémov, ktoré charakterizuje nelinearita ich správania sa, holarchické vnáranie sa holónov do vyšších systémov, zložitá vnútorná kauzalita, spätné väzby a autokatalytické cykly, emergentné vlastnosti, vysoká dynamika a zložitosť.

Spätná väzba Kruhové usporiadanie kauzálne spojených prvkov, z ktorých posledný prvok ovplyvňuje počiatočný prvok, čím sa spätná väzba uzatvára.

Stres (v biológii a ekológii) Obranná reakcia organizmu na nepriaznivý vplyv niektorého ekologického faktora alebo faktorov, ktorý sa dostal mimo oblasti optima pre daný organizmus.

Stresor (v biológii a ekológii) Ekologický faktor pôsobiaci mimo oblasti jeho optima pre daný organizmus.

Subatómové častice Extrémne malé častice, ktoré vytvárajú štruktúru atómu. Zloženými časticami sú protóny a neutróny, ktoré sú tvorené fundamentálnymi (elementárnymi) časticami. Sú nimi kvarky, leptóny a bozóny.

Sukcesia (ekologická) Jednosmerný, necyklický, nesezónny a spravidla dlhodobý proces vývoja biocenóz (zmien ich štruktúry a funkcií) v čase, vyvolaný zmenami fyzikálnych a chemických faktorov prostredia, ktoré sú podmienené vývojom biocenózy. Tieto zmeny vedú k miestnym vyhynutiam druhov a k postupnej rekolonizácii stanovišťa novými druhmi, ktorým vyhovujú zmenené podmienky; v priebehu sukcesie sa takto vystrieda viacero rôzne dlho pretrvávajúcich sukcesných štádií, ktoré sa odlišujú svojím druhovým zložením.

Súmernosť Zhoda, rovnomernosť, pravidelnosť a proporčnosť tvarov objektov alebo priebehu procesov v prírodnom systéme, je preto dôležitou súčasťou harmónie v neživej a najmä v živej prírode. Najznámejšou zmyslovou skúsenosťou je geometrická súmernosť, zjavná napr. v kryštáloch minerálov, v snehovej vločke, v listoch, kvetoch a plodoch rastlín, v habituse stromov a v telách živočíchov.

Symetria → ***Súmernosť***

Symetrická konkurencia Vzájomne proporčná konzumácia limitovaných prírodných zdrojov jednotlivými organizmami, ktorá zhruba rovnako znižuje ich dostupnosť pre rôzne jedince alebo rôzne druhy.

Synantropia Život určitých druhov rastlín, húb a živočíchov v urbánnej krajine, spravidla tesnej blízkosti ľudských sídel, komunikácií, priemyselných závodov a pod.

Synantropný druh Druh organizmu žijúci v urbánnej krajine, spravidla v tesnej blízkosti človeka.

Synergetika Veda, ktorá sa zaoberá výskumom súčinnosti pôsobenia viacerých prvkov (resp. činiteľov) a tým aj vzniku nových vlastností prostredníctvom interakcií medzi nimi.

Synergéza Vznik novej kvality v dôsledku interakcií veľkého počtu prvkov a následného vzniku nových štruktúr, synchronizovaných procesov a nových emergentných vlastností a správania systému.

Synergia Súčinnosť, spolupôsobenie aspoň dvoch faktorov, ktoré je často silnejšie ako súčet individuálnych pôsobení. V ekológii môže označovať negatívne spolupôsobenie viacerých faktorov, napr. zmeny klímy, odlesňovania, úbytku biodiverzity, znečisťovania prostredia, dezertifikácie a pod.

Syntetická biológia Výskumná oblasť zameraná na syntézu nových syntetických biologických komponentov, ako aj celých organizmov, príp. aj na pretváranie existujúcich prírodných systémov.

Synúzia Miestna skupina jedného alebo viacerých druhov organizmov rovnakej životnej formy, súčasť jednej etáže biologického spoločenstva.

Systém Fyzické prvky systému a vzťahy medzi nimi, ktoré tieto prvky prepájajú a súčasne systém organizačne vyčleňujú z jeho okolia. Každý systém charakterizujú fyzické hranice, jeho základné entity – prvky (konštituenty) systému, ich interakcie a procesy, toky látok, energie a informácie, vlastnosti a dynamika celku.

Systémová ekológia Veda o štruktúre, procesoch, funkciách a správaní zložitých ekologických systémov a o hľadaní spoločných, jednotiacich princípov ich organizácie. Kladie dôraz na štúdium a aplikáciu systémových princípov (pôsobiacich analogicky na rôznych hierarchických úrovniach organizácie systému) v ekológii.

Systémový pohľad na prírodné zdroje Prírodné zdroje planéty nemôžu slúžiť iba človeku, pretože sú nevyhnutné aj pre život ďalších organizmov. Preto je etické a ekologicky nevyhnutné podeliť sa o dostupné prírodné zdroje aj s mimoľudskými formami života.

Systémový prístup Dôraz na štúdium štruktúry, procesov a emergentných vlastností celku, systémové vnímanie zahŕňa nielen prvky, ale aj siete vzťahov medzi nimi, prebiehajúce procesy a celistvosť a funkčnosť celku.

Šírkové pásma Zeme Rovnobežkami ohraničené široké pásy Zeme, ktoré reflektujú rozdielne oslnenie zemského povrchu a jeho zmeny počas dňa a roka. Zhruba sa prekrývajú s hlavnými podnebnými pásmami, pre ktoré sú charakteristické rovnaké klimatické vlastnosti.

Štruktúra (systému) Fyzická výstavba systému, ktorá zahŕňa jeho prvky aj väzby medzi nimi.

Štruktúra ekologického systému Rozmiestnenie organizmov, biotopov (alebo ekosystémov nižšej hierarchickej úrovne) v priestore, ich hojnosť a väzby medzi nimi.

Štrukturálna zložitosť (v biológii a ekológii) Zložitosť fyzickej štruktúry systému, od živej bunky cez organizmy až po ekosystémy.

Štrukturálna zložka ekologickej zložitosti Vyjadruje zložitosť fyzickej štruktúry ekosystému alebo sociálno-ekologického systému, predovšetkým vertikálnu výstavbu vegetácie, ale aj jeho druhovú diverzitu resp. aj diverzitu jeho biotopov. Podľa niektorých autorov k nej patrí aj veľkosť súhrnnej genetickej informácie prítomnej v ekosystéme v genómoch jeho organizmov.

Taxón Systematická jednotka hierarchickej klasifikácie organizmov, skupina organizmov so spoločnými znakmi, ktorými sa odlišujú od iných taxónov. Jednotlivé druhy taxónov majú svoje názvy (napr. druh, rod, čeľaď, rad, trieda, oddelenie, kmeň, ríša, doména).

Tektológia Teória organizácie zložitých systémov rozvíjaná už na začiatku 20. storočia v Rusku.

Temná hmota Vesmírna hmota, ktorá neinteraguje so svetlom a preto ju nie je možné vidieť. Možno ju však detekovať, odhadovať jej hmotnosť aj mapovať jej rozmiestnenie, pretože pôsobenie tejto hmoty sa prejavuje gravitačne.

Teória biotickej vodnej pumpy Fyzikálna teória, že prísun vody z oceánu nad pevninu do značnej miery súvisí s vegetačnou pokrývkou kontinentu, predovšetkým s rozsiahlymi lesmi.

Teória chaosu Odvetvie matematiky, ktoré sa zaoberá štúdiom zdanlivo chaotickej dynamiky zložitých systémov. Podľa tejto teórie aj za zjavne silne náhodným, chaotickým správaním zložitých dynamických systémov môžeme nájsť určité pevné pravidlá, ktoré toto správanie generujú.

Teória jemne vyladeného vesmíru Fyzikálna záhada jemného „vyladenia“ kľúčových fyzikálnych konštánt, ktoré umožnili vznik a rozvoj života.

Teória o inteligencii rastlín Experimentami podložená teória o tom, ako rastliny vzájomne komunikujú prostredníctvom nimi generovaných prchavých organických látok alebo mykoríznej siete, ako sa informujú napr. o zvýšenom tlaku herbivorov resp. tiež o tom, ako tzv. materské stromy v lese pomáhajú semenáčikom a mladým jedincom zasielaním živín cez mykoríznu sieť.

Teória systémov Teória, ktorá umožňuje na systémy rôznej povahy (napr. biologický, ekologický, technický, sociálny, ekonomický) aplikovať spoločné modely, princípy a zákonitosti ich organizácie.

Teratogén Chemická látka, patogén alebo energia (napr. ionizujúce žiarenie), ktoré môžu vyvolať poškodenie plodu alebo jeho časti, vrodenú poruchu organizmu a tiež potrat.

Terestrický ekosystém Suchozemský ekosystém. V širšom slova zmysle tento pojem zahŕňa suchozemské aj sladkovodné ekosystémy vyskytujúce sa na pevnine.

Termodynamicky otvorený systém Systém je otvorený k viac menej neustálym tokom energie cez jeho hranice.

Termodynamika Odbor fyziky, v ktorom sa skúmajú otázky šírenia tepla, resp. tokov energie a jej transformácií v systémoch a k nim relevantných vlastností hmoty.

Termonukleárna reakcia (termojadrová syntéza) Druh jadrovej sysntézy dvoch ľahkých jadier do jedného ťažšieho jadra, ktorá prebieha pri extrémne vysokých teplotách a tlaku a uvoľňuje sa pri nej veľké množstvo energie.

Tkanivo Mnohobunková štruktúra špecializovaných buniek, ktoré sú organizované takým spôsobom aby mohli v organizme živočícha vykonávať určitú hlavnú spoločnú funkciu.

Tlaková níž (cyklóna) Oblasť nízkeho tlaku vzduchu, ktorý je najnižší v jej strede a vzduch preto prúdi od jej okrajov do stredu. Charakterizujú ju vzostupné pohyby vzduchu a veľká oblačnosť so zrážkami.

Tlaková výš (anticyklóna) Oblasť vysokého tlaku vzduchu, ktorý je najvyšší v jej strede a vzduch preto prúdi od jej stredu k okrajom. To vyvoláva zostupné pohyby vzduchu a málooblačné až bezoblačné počasie.

Tranformácia Premena hmoty, energie alebo informácie realizovaná v biologickom, ekologickom, sociálnom alebo technickom systéme.

Transkripčné faktory Súhrnné pomenovanie akýchkoľvek bielkovín, ktoré majú schopnosť spúšťať a/alebo regulovať transkripciu DNA v eukaryotickej bunke.

Transpersonálny Postoj alebo prístup presahujúci úzke osobné alebo skupinové záujmy, pri využívaní prírodných zdrojov vedie k rešpektovaniu potrieb mimoľudských organizmou a k identifikácii sa s krajinou.

Transpirácia (botanika) Výdaj vody v podobe vodnej pary z vnútra rastliny povrchom rastlín (cez prieduchy alebo priamo cez kutikulu) do atmosféry, čím sa rastlina zároveň ochladzuje. Úzko súvisí s transpiračným prúdom vedúcim od koreňa do nadzemných častí rastliny.

Tropický dažďový prales Pôvodný prírodný les, ktorý sa vyskytuje v územiach s tropickou klímou (medzi 10° až 15° severnej a južnej zemepisnej šírky), ktorá je po celý rok vlhká, t.j. bez obdobia sucha a so zrážkami viac ako 2 000 mm ročne. V týchto pralesoch žije najmenej polovica všetkých druhov Zeme, pričom najmenej na polovici ich pôvodnej rozlohy už boli tieto pralesy zlikvidované človekom.

Trvalo udržateľný rozvoj → ***Udržateľný rozvoj***

Účinnosť disipácie energie Miera schopnosti ekosystému disipovať energiu, podiel disipovanej energie voči celkovej prijatej energii (u podstatnej väčšiny ekosystémov Zeme ide o disipáciu slnečnej energie).

Udržateľný rozvoj *„Rozvoj, ktorý zabezpečuje napĺňanie potrieb súčasných generácií bez toho, aby to robil na úkor schopnosti budúcich generácií zabezpečiť svoje vlastné potreby“*. Ide o integráciu troch pilierov – environmentálneho (resp. ekologického), ekonomického a sociálneho v rámci socio-ekonomickej sféry aj životného štýlu. V súčasnosti je v platnosti Stratégia udržateľného rozvoja Agenda 2030, prijatá Valným zhromaždením OSN (2015).

Udržateľný sociálno-ekologický systém Model sociálno-ekologického systému, ktorý vzniká integráciou ľudských aktivít s prírodou a krajinou a v ktorom sa zdôrazňuje nevyhnutnosť pri akýchkoľvek ľudských aktivitách rešpektovať primárne ekologické a primárne sociálne limity.

Udržateľný ústup Návrh určitej kontrakcie socioekonomických aktivít za účelom zníženia antropogénnych tlakov na Zemský systém a jeho následnej spontánnej sebaobnovy.

Udržateľný vývoj Výsledok revízie koncepcie udržateľnosti, ktorý zdôrazňuje kvalitatívny vnútorný rozvoj namiesto kvantitatívneho rozvoja (expanzie ľudskej spoločnosti za cenu ničenia prírodných ekosystémov).

Ultrafialové žiarenie (UV žiarenie) Elektromagnetické žiarenie vlnových dĺžok 10 až 400 nm, t.j. kratších ako má viditeľné svetlo a dlhších ako má röntgenové žiarenie. Člení sa na UV-A žiarenie (vlnových dĺžok 315 – 400 nm), pre živé organizmy nebezpečné žiarenie UV-B žiarenie (280-315 nm), ktorého podstatnú časť absorbuje ozónová vrstva a letálne UV-C žiarenie (pod 280 nm), plne absorbované touto vrstvou a extrémne UV žiarenie (E-UV, vlnové dĺžky pod 31 nm). Prirodzeným zdrojom UV žiarenia je Slnko.

Urbanizácia Ľudské aktivity, ktoré vedú k zvyšovaniu podielu mestského obyvateľstva oproti vidieckemu. V mnohých štátoch sa za urbánny priestoru považuje oblasť, ktorú obýva viac ako 2 500 ľudí.

Územný systém ekologickej stability (ÚSES) Celopriestorová štruktúra navzájom prepojených a účelne rozmiestnených ekosystémov, ich zložiek a prvkov, ktorá by mala zabezpečiť rozmanitosť podmienok a foriem života v krajine. Základnými ekostabilizačnými prvkami tohto systému sú biocentrá, biokoridory a interakčné prvky. V krajine sa rozlišuje hierarchia týchto systémov, od miestneho (napr. na úrovni obce) cez regionálny (na úrovni okresu) až po nadregionálny (celoštátny) ÚSES.

Veda Systematické získavanie, spracovávanie, interpretovanie a overovanie poznatkov o tom, ako funguje svet. Pozorovaniami, experimentami aj dedukciou odkrýva usporiadanie, ktoré nachádza v prírodných, sociálnych a technických systémoch, snaží sa predpovedať ich vývoj a umožniť ich riadenie.

Vedenie tepla (kondukcia tepla) Šírenia tepla v telesách, pri ktorom si častice materiálu pri vzájomných zrážkach odovzdávajú časť svojej pohybovej energie.

Vegetačná stupňovitosť → ***Výšková zonálnosť vegetácie***

Vegetačné výškové stupne → ***Výšková zonálnosť vegetácie***

Veľké zrýchlenie Vysoké, exponenciálne zrýchlenie socio-ekonomického rozvoja spoločnosti po roku 1950, ktoré sa však premieta do výrazných zmien a degradácie ekosystémov, vrátane Zemského ekosystému. K prejavom zložitosti patrí aj vznik emergentných vlastností na každej úrovni hierarchického usporiadania systému.

Veľký tresk (Big Bang) Začiatok rozpínania vesmíru z pôvodnej singularity približne pred 13,8 miliardami rokov. V tejto singularite bola nepredstaviteľne vysoká teplota a tlak, priestor, čas ani fyzikálne zákony akoby neexistovali.

Viditeľné svetlo Elektromagnetické žiarenie vlnových dĺžok v rozsahu približne 380 až 740 nm, ktoré je viditeľné ľudským okom a predstavuje 40-41% na Zem dopadajúceho slnečného žiarenia. Najväčšia intenzita vyžarovania slnka je vo vlnových dĺžkach 500

nm, čo zodpovedá zelenej farbe. Pretože práve vegetácia ho najviac odráža, jej farbu vnímame ako zelenú.

Vlnová dĺžka Vzdialenosť medzi amplitúdami dvoch po sebe nasledujúcich vĺn postupného periodického vlnenia (alebo medzi inými dvoma bodmi týchto vĺn, ktorých postavenie voči použitým súradniciam je rovnaké). V prípade žiarenia je táto dĺžka v obrátenom pomere k teplote objektu a ním vyžarovanej energii.

Vnútorná energia telesa V ňom obsiahnutá energia, ktorá nezahŕňa kinetickú ani polohovú energiu systému ako celku. Je to súborná energia všetkých mikroskopických režimov energie, ktoré súvisia s náhodným pohybom a vnútornou štruktúrou molekúl.

Vodný cyklus → Hydrologický cyklus

Vymieranie druhov Prirodzený komplementárny proces k speciácii, evolučnému vývoju nových druhov. Problém je, že súčasné tempo vymierania druhov podľa odhadov 100 až 1 000 násobne prevyšuje prirodzené tempo.

Výkal → ***Exkrement***

Výšková zonálnosť vegetácie (vegetačná stupňovitosť, vegetačné výškové stupne) Ide o vertikálne rozvrstvenie vegetačných stupňov, ktoré súvisí so zmenou nadmorskej výšky, makro- a mezoklímy. Prirodzená odlišnosť a charakteristické druhové zloženie vegetácie jednotlivých horizontálnych úsekov je spôsobené vertikálnou členitosťou územia, rozdielmi v súbore klimatických faktorov (napr. teplota ovzdušia, zrážky, insolácia atď.) a geomorfológie (mohutnosť pohorí, orientácia svahov atď.). Prechod medzi vegetačnými stupňami je postupný.

Zasoľovanie pôdy Akumulácia vo vode rozpustných solí v pôde, ktorá nastáva najmä v aridnych a semiarídnych oblastiach s vysokým výparom v kombinácii s hladinou mineralizovanej podzemnej vody blízko povrchu alebo pri intenzívnom zavlažovaní. V oboch prípadoch v pôde a na jej povrchu kryštalizujú soli.

Zákon zachovania energie Celková energia v izolovanej fyzikálnej sústave sa nemení, to znamená, že energia nevzniká ani nezaniká, môže sa iba meniť z jednej formy na inú.

Zákon zachovania hmoty Môžeme vytvárať nové zlúčeniny a iné rozkladať alebo môžeme meniť koncentráciu určitej látky, ale hmotu ako takú nemôžeme vytvoriť ani zničiť. Pri termojadrových syntézach sa však malá časť hmoty mení na energiu. Vzhľadom k hmotnosti Zeme vo vzťahu k dopadajúcim meteoritom môžeme za konečnú považovať aj hmotu Zeme a prírodných zdrojov.

Záporná spätná väzba Taký spätnoväzobný okruh, v ktorom zmena na jeho počiatku po prechode okruhom vedie k zoslabeniu tejto zmeny. Záporná spätná väzba je kritická pre udržanie vnútornej homeostázy organizmov aj ekologickej rovnováhy ekosystémov, preto sa nazýva aj stabilizačnou väzbou. Kladná a záporná spätná väzba sa v prírode vzájomne dopĺňajú a často sú súčasťou zložitých autopoietických sietí (napr. v prípade potravných sietí).

Zelená revolúcia Výrazné spriemyselnenie konvenčného poľnohospodárstva v 50. a 60. rokoch minulého storočia, ktorého základom boli nové vysoko výnosné odrody obilovín, vysoká mechanizácia, vysoké vstupy priemyselne vyrábaných minerálnych hnojív a agrochemikálií (najmä pesticídov, stimulátorov rastu a defoliantov). Pozitívom zelenej revolúcie bolo výrazné zvýšenie globálnej poľnohospodárskej produkcie. Tento spôsob produkcie však súčasne viedol k prudkému nárastu negatívnych vplyvov poľnohospodárstva na pôdu, vodu, ovzdušie a biodiverzitu poľnohospodárskej krajiny.

Zemský systém (Zemský ekologický systém) Najvyššia známa organizácia ekologického systému, ktorého funkčnosť zabezpečujú interakcie medzi jeho komponentami – najmä litosféry, atmosféry, hydrosféry, pedosféry a biosféry, ale aj noosféry.

Zhutnenie pôdy Antropogénne zhutnenie pôdy je dôsledkom silného mechanického tlaku na pôdu (najmä poľnohospodárskymi strojmi alebo dobytkom), vedie k zníženiu pórovitosti pôdy a jej schopnosti zadržiavať vodu, v zhutnenej pôde je aj menej živín a výrazne negatívne ovplyvňuje pôdne organizmy.

Zložitosť (komplexita) Zložitosť organizácie systému charakterizuje prítomnosť veľkého počtu prvkov a ich rozmanitosť, rozmanitosť ich interakcií, procesov a sieťových štruktúr, ako aj vysoká dynamika správania sa celku systému.

Zložitosť živých systémov Rozlišuje sa 1) štrukturálna zložitosť – počty a rozmanitosť prvkov a ich interakcií, hĺbka a priestorový rozsah hierarchií a 2) funkčná (behaviorálna) zložitosť – počty a rozmanitosť procesov resp. postupností stavov systému, ktoré sú obrazom správania celku. K obrazu zložitosti patrí aj integrácia prvkov a procesov systému podľa jedinečných organizačných vzorcov zabezpečujúca funkčnosť celku.

Zložitý adaptívny systém Zložitý systém, ktorého funkčné vzorce pozorované na vyšších hierarchických úrovniach, napr. biogeochemické cykly, klimatický systém a iné, sa vynárajú z lokálnych interakcií a adaptácií prvkov na nižších úrovniach organizácie, čo vedie k tomu, že aj systém samotný ma určitú kapacitu adaptácie k zmenám.

Zlúčenina Homogénna látka, ktorá pozostáva z molekúl tvorených atómami dvoch alebo viacerých chemických prvkov, ktoré sú v nej zlúčené v určitom rovnakom vzájomnom pomere a sú udržiavané spolu chemickými väzbami.

Zmena klímy Prevažujúce označovanie v súčasnosti postupujúcej globálnej klimatickej zmeny, ktorú podľa prevládajúceho vedeckého konsenzu spôsobili predovšetkým aktivity človeka, osobitne zosilnenie skleníkového efektu v dôsledku spaľovania fosílnych palív a tiež zmeny krajinnej pokrývky.

Znečisťovanie (pôdy, vody, ovzdušia) Vnášanie takých látok, energií a organizmov, ktoré sú pre danú abiotickú zložku prostredia cudzorodé alebo ich koncentrácia v ňom je neprirodzene vysoká. Znečistenie vedie k zmene fyzikálnych, chemických a biologických vlastností danej zložky prostredia a jej kvality a môže mať nepriaznivé vplyvy na ľudské zdravie a na iné organizmy alebo zabraňuje využiť príslušné médium na plánovaný účel (napr. pôdu na produkciu potravín, vodný zdroj na získanie pitnej vody).

Zonálnosť (pásmovitosť) vegetácie Pásmovité usporiadanie nížinných suchozemských vegetačných formácií a ich podmieňujúcich faktorov (edifikátorov) v závislosti od zemepisnej šírky a makroklímy. Tá závisí od insolácie zemského povrchu a od globálnej cirkulácie atmosféry ovplyvnenej napr. rozlohou a polohou oceánov či samotných kontinentov, mohutnosťou a orientáciou veľkých pohorí, atď. Klimaxové vegetačné formácie nížinných polôh vytvárajú rozsiahle vegetačné zóny.

Zosuv (zosun) Zväčša pomerne rýchly pohyb pôdy alebo horniny po svahu podmienený gravitáciou. Na vznik zosuvov vplývajú prírodné podmienky, napr. geologická stavba odložia, hydrogeologické pomery, reliéf povrchu, klíma a počasie (najmä intenzívne zrážky) alebo činnosť človeka, naopak, opačne pôsobí vegetácia, ktorá má schopnosť do určitej miery svahy stabilizovať.

Zrážky Voda pochádzajúca z kondenzácie vodnej pary v ovzduší, ktorá padá na zemský povrch vo forme dažďa, snehu alebo krúpov (ľadovca) alebo kondenzuje či zamŕza priamo na zemskom povrchu (napr. inoväť).

Zvetrávanie Pôsobenie fyzikálnych, chemických alebo biologických procesov na odkryté horniny, ktoré vedie k ich rozrušovaniu a k následnej erózii.

Živiny Chemické prvky alebo potrava, ktoré musí organizmus prijímať resp. konzumovať, aby zabezpečil svoje vlastné prežívanie, rast a reprodukciu.

Životné prostredie Vytvára prirodzené podmienky pre existenciu živých organizmov. Jeho abiotickými zložkami sú horniny, pôda, ovzdušie, klíma, voda a reliéf, biotickými zložkami sú (v tradičnom poní-maní) rastliny, živočíchy, huby a mikroorganizmy.

POUŽITÁ LITERATÚRA

ABBOTT B.W., BISHOP K., ZARNETSKE J.P., MINAUDO C., CHAPIN F.S., KRAUSE S., HANNAH D.M., CONNER L., ELLISON D., GODSEY S.E., PLONT S., MARCAIS S., KOLBE T., HUEBNER A., FREI R.C., HAMPTON T., GU S., BUHMAN M., SAYEDI S.S., URSACHE O., CHAPIN M., HENDERSON K.D. & PINAY G., 2019. Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions. *Nature geoscience* 12: 533 – 540.

ADAMI CH., OFRIA CH. & COLLIER T.C., 2000. Evolution of biological complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97 (9): 4463 – 4468.

ADAMS K. MacG., HESTER P.T. & BRADLEY J.M., 2013. A Historical Perspective of Systems Theory. In: Krishnamurthy A., Chan W.K.V. (eds.), Proceedings of the 2013 Industrial and Systems Engineering Research Conference, 9 s. [online], cit. 2019-09-10, <https://www.researchgate.net/publication/288782223_A_historical_perspective_of_systems_theory>.

ADL S.M., SIMPSON A.G.B., LANE CH.E., LUKEŠ J., BASS D., BOWSER S.S., BROWN M.W., BURKI F., DUNTHORN M., HAMPL V., HEISS A., HOPPENRATH M., LARA E., GALL L.L., LYNN D.H., MCMANUS H., MITCHELL E.A.D., MOZLEY-STANRIDGE S.E., PARFREY L.W., PAWLOWSKI J., RUECKERT S., SHADWICK L., SCHOCH C.L., SMIRNOV A. & SPIEGEL F.W., 2012. The Revised Classification of Eukaryotes. *The Journal of Eukaryotic Micobiology* 59 (5): 429 – 493.

AERTS R., WAGENDORP T., NOVEMBER E., BEHAILU M., DECKERS J. & MUYS B., 2004. Ecosystem Thermal Buffer Capacity as an Indicator of the Restoration Status of Protected Areas in the Northern Ethiopian Highlands. *Restoration Ecology* 12 (4): 586 – 596.

ALBRECHT G., SARTORE G.-M., CONNOR L., HIGGINBOTHAM N., FREEMAN S., KELLY B., STAIN H., TONNA A. & POLLARD G., 2007: Solastalgia: the distress caused by environmental change. *Australasian Psychiatry* 15 Suppl 1: 95 – 98.

ALLEN C.R. & HOLLING C.S., 2010. Novelty, adaptive capacity, and resilience. *Ecology and Society* 15 (3): 24.

ALLES D., 2013. The Evolution of the Universe. Western Washington University. 57 s. [online], cit. 2018_08_08, <http://fire.biol.wwu.edu/trent/alles/Cosmic_Evolution.pdf>.

ALVAREZ C., 1995. Does the World Need „Modern" Science? In: Wakeford T., Walters M. (eds.), Science for the Earth, John Wiley a Sons, Chichester, UK, s. 65 – 86.

AMENT R., CALLAHAN R., MCCLURE M., REULING M. & TABOR G., 2014. Wildlife Connectivity: Fundamentals for conservation action. Center for Large Landscape Conservation, Bozeman, Montana. 40 s. [online], cit. 2017-09-02, <http://largelandscapes.org/media/publications/Wildlife-Connectivity-Fundamentals-for-Conservation-Action.pdf>.

ANDREAS B.K., MACK J.J. & McCORMAC J.S., 2004: Floristic Quality Assessment Index (FQAI) for vascular plants and mosses for the State of Ohio. Ohio Environmental Protection Agency, Division of Surface Water, Wetland Ecology Group, Columbus, Ohio. 219 s.

ANDREASEN J.K., O´NEILL R.V., NOSS R. & SLOSSER N.C., 2001. Considerations for the development of a terrestrial index of ecological integrity. *Ecological Indicators* 1 (1): 21 – 35.

ANILLA A. & KUISMANEN E., 2009. Natural hierarchy emerges from energy dispersal. *Biosystems* 95: 227 – 233.

ARUMA E.O. & HANACHOR M.E., 2017. Abraham Maslow´s hierarchy off needs and assesment of needs in community development. *International Journal of Development and Economic Sustainability* 5 (7): 15 – 27. [

AUSTRALIAN GOVERNMENT, 2020. Annual climate statement 2019. Australian Government, Bureau of Meteorology, 9th January 2020, [online], cit. 2020-2-15, <http://www.bom.gov.au/climate/current/annual/aus/?utm_medium=social%20media&utm_source=twitter&utm_campaign=climate&utm_term=climate&utm_content=video-080120-nnualclimatestatement&fbclid=IwAR3HNDSbYxCOh7BpThzbwgFgrPCdjrHo39sn7ogSoGeXfn4dDAkVaYCUfMc>.

AZEROUAL M., EL MAKRINI A., EL MOUSSAOUI H. & EL MARKHI H., 2018. Renewable Energy Potential and Available Capacity for Wind and Solar Power in Morocco Towards 2030. *Journal of Engineering Science and Technology Revie*w 11 (1): 189 – 198.

BALIAK F., PAŠEK J. & NEMČOK A., 1981. Svahové deformácie v Krivánskej Malej Fatre. In: Janík M., Štollmann A. (eds.), Rozsutec – Štátna prírodná rezervácia. Osveta, Martin, s. 126 – 142.

BARNOSKY A.D., HADLY E.A., BASCOMPTE J., BERLOW E.L., BROWN J.H., FORTELIUS M., GETZ W.M., HARTE J., HASTINGS A., MARQUET P.A., MARTINEZ N.D., MOOERS A., ROOPNARINE P., VERMEIJ G., WILLIAMS J.W.,

GILLESPIE R., KITZES J., MARSHALL CH., MATZKE N., MINDELL D.P., REVILLA E. & SMITH A.B., 2012. Approaching a state shift in Earth's biosphere. *Nature* 486: 52 – 58.

BAUR B., CREMENE C., GROZA G., RAKOSY L., SCHILEYKO A.A., BAUR A., STOLL P. & ERHARDT A., 2006. Effects of abandonment of subalpine hay meadows on plant and invertebrate diversity in Transylvania, Romania. *Biological Conservation* 132: 261 – 273.

BC PARKS, 2012. Ecological Integrity in British Columbia´s Parks and Protected Areas. British Columbia´s Parks, [online], cit. 2019-09-15, <http://www.env.gov.bc.ca/bcparks/conserve/ecological-integrity-def-and-perf-indicators.pdf>.

BEDNAREK A., SZKLAREK S. & ZALEWSKI M., 2014. Nitrogen pollution removalfrom areas of intensive farming – comparisonm of various denitrification technologies. *Ecohydrology* & *Hydrobiology* 14: 132 – 141.

BEGON M., HARPER J.L. & TOWNSEND C.R., 1997. Ekologie: Jedinci, populace a spoločenstva, Vydavatelství University Palackého, Olomouc (český preklad), ISBN 80-7067-695-7, 949 s.

BELČÁKOVÁ I., 2013. Ochrana, tvorba a manažment krajiny. Trio Publishing, Bratislava, ISBN 978-80-89552-37-5, 128 s.

BELOKOPYTOV Y.N., 2013. General Organization Theory. *Journal of Siberian Federal University*. *Humanities & Social Sciences* 7 (6): 1027 – 1032.

BENÍTEZ-LÓPEZ A., ALKEMADE R., SCHIPPER A.M., INGRAM D.J., VERWEIJ P.A. & EIKELBOOM J.A.J., 2017. The impact of hunting on tropical mammal and bird populations. *Science* 14: 180 – 183.

BENNETT A.F., 2003. Linkages in the Landscape : The Role of Corridors and Connectivity in Wildlife Conservation. IUCN, The World Conservation Union, ISBN 2-8317-0744-7, 254 s.

BERNÁTOVÁ D., UHLÍŘOVÁ J. & TOPERCER J. ml., 1998. Aktuálne poznatky o subalpínskej vegetácii Kriváskej Fatry a návrh na jej manažment. In: Korňan M. (ed.), Výskum a ochrana Kriváskej Fatry. Správa národných parkov SR, Správa NP Malá Fatra, Varín, s. 49 – 51.

von BERTALANFFY L., 1968. General System Theory, Foundations, Development and Applications. George Brazilier, New York, 365 s.

von BERTALANFFY L., 1972. The History and Status of General System Theory. *The Academy of Management Journal* 15 (4): 407 – 426.

BIO, 2020. Synthetic Biology Explained. Biotechnology Innovation Organization. [online], cit. 2020-06-10, <https://archive.bio.org/articles/synthetic-biology-explained>.

BIRDLIFE INTERNATIONAL, 2013. Europe-wide monitoring schemes highlight declines in widespread farmland birds. [online], cit. 2020-05-05, <http://datazone.birdlife.org/sowb/casestudy/europe-wide-monitoring-schemes-highlight-declines-in-widespread-farmland-birds/>.

BLACKBURN T.M., PYŠEK P., BACHER S., CARLTON J.T., DUNCAN R.P., JAROŠÍK V., WILSON J.R.U. & RICHARDSON D.M., 2011. A proposed unified framework for biological invasions. *Trends in Ecology and Evolution* 26 (7): 333 – 339.

BLÖSCHL G., KISS A., VIGLIONE A., BARRIENDOS M., BÖHM O., BRÁZDIL R., COEUR D., DEMARÉE G., LLASAT M.C., MACDONALD N., RETSÖ D., ROALD L., SCHMOCKER-FACKEL P., AMORIM I., BĚLÍNOVÁ M., BENITO G., BERTOLIN CH., CAMUFFO D., CORNEL D., DOKTOR R., ELLEDER L., ENZI S., GARCIA J.C., GLASER R., HALL J., HASLINGER K., HOFSTÄTTER M., KOMMA J., LIMANÓWKA D., LUN D., PANIN A., PARAJKA J., PETRIĆ H., RODRIGO F.S., ROHR CH., SCHÖNBEIN J., SCHULTE L., SILVA L.P., TOONEN W.H.J., VALENT P., WASER J. & WETTER O., 2020. Current European flood-rich period exceptional compared with past 500 years**.** *Nature* 583 (7817): 560.

BOCCATELLI S., GREBOGI C., LAI Y.-C., MANCINI H. & MAZA D., 2000. The Control of Chaos: Theory and Applications. *Physics Reports* 329 (3): 103 – 197.

BODEN M.A., 2000. Autopoiesis and Life. *Cognitive Science Quarterly* 1: 117 – 145.

BORRETT S.R. & FATH B.D., 2014. Introduction to the special issue „Systems Ecology: A Network Perspective and Retrospective". *Ecological modelling* 293: 1 – 3.

BORRINI-FEYERABEND G. & BUCHAN D. (eds.), 1997. Beyond Fences: Seeking Social Sustainability in Conservation. Vol. 1. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK, ISBN 2-8317-0340-9, v+ 129 s.

BRAJE T.J. & ERLANDSON J.M., 2013. Human acceleration of animal and plant extinctions: A Late Pleistocene, Holocene, and Anthropocene continuum. *Anthropocene* 4: 14 – 23.

BRANIŠ M. & HŮNOVÁ I. (eds.), 2009: Atmosféra a Klima. Aktuální otázky ochrany ovzduší. Univerzita Karlova v Praze, Karolinum, ISBN 978-80-246-1598-1, 351 s.

BRASHARES J.S., GOLDEN C.D., WEINBAUM K., BARRETT C. & OKELLO G., 2011. Economic and geographic drivers of wildlife consumption in rural Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108 (34): 13931 – 13936.

BRAUN-BLANQUET J., 1932. Plant sociology. The study of plant communities. McGraw-Hill Book Co., New York and London, 439 s.

BREZOVSKÁ K. & HOLÉCY J., 2009. Ocenenie rekreačnej funkcie lesov Vysokých Tatier metódou cestovných nákladov. In: Acta Facultatis Forestalis Zvolen, LI (Suppl. 1): 151 – 162.

BROM J. & POKORNÝ J., 2009. Temperature and humidity characteristics of two willow stands, a peaty meadow and a drained pasture an their impact on landscape functioning. *Boreal Environment Research* 14 (3): 389 – 403.

BROOK B.W. & BOWMAN D.M., 2002. Explaining the Pleistocene megafaunal extinctions: Models, chronologies and assumptions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99 (23): 14 624 – 14 627.

BROWN E.D. & WILLIAMS B.K., 2016. Ecological integrity assessment as a metric of biosiversity: are we measuring what we say we are? *Biodiversity Conservation* 25 (6): 1011 – 1035.

BRUNOVSKÝ P. & ČERNÝ J., 1980. Základy matematickej teórie systémov, VEDA, vydavateľstvo SAV, Bratislava, 166 s.

BUCUR C. & STROBEL D., 2012. Valuation of Ecosystem Services in Carpathian Protected Areas – Guidelines for rapid assessment. Green Steps, Braşov, ISBN 978-606-93042-2-8, 26 s.

BUČEK A., LACINA J. & MÍCHAL I., 1996: An ecological network in the Czech Republic. *Veronica* 10/11 (zvláštní vydání): 1 – 44.

BUCHAR J., DROBNÍK J., HADAČ E., JANKO J., KVĚT J., LELLÁK J. & ROČEK Z., 1987. Život. Mladá Fronta, Praha, 477 s.

BUNN S.E. & DAVIES P.M., 2000. Biological processes in running waters and their implications for the the assessment of ecological integrity. *Hydrobiologia* 422/423: 61 – 70.

BUNN G., URBAN D.L. & KEITT T.H., 2000. Landscape connectivity: a conservation application of graph theory. *Journal of Environmental Management* 59: 265 – 278.

BURKHARD B., KROLL F., MÜLLER F. & WINDHORST F., 2009. Landscapes' Capacities to Provide Ecosystem Services – a Concept for Land-Cover Based Assessments. *Landscape Online* 15: 1 – 22. [online], cit. 2016-5-15, <http://www.landscape-online.de/archiv/2009/15/Burkhard_etal_LO15_2009.pdf>.

BURKHARD B., KROLL F., NEDKOV S. & MÜLLER F., 2012. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators* 21:17 – 29.

BURKHARD B., KANDZIORA M., HOU Y. & MÜLLER F., 2014. Ecosystem Service Potentials, Flows and dDemands – Concepts for Spatial Localisation, Indication and Quantification. *Landscape online* 34: 1 – 32.

BURKHARD B. & MAES J. (eds.), 2017. Mapping Ecosystem Services. Sofia, Pensoft Publishers, ISBN 978-954-642-830-1, 374 s.

BURTON R. & SHWARTZ G., 2013. Result-oriented agri-environment schemes in Europe and their potential for promoting behavioural change. *Land Use Policy* 30 (1): 628 – 641.

CADENASSO M.L., PICKETT S.T.A & GROVE J.M., 2006. Dimensions of ecosystem complexity: Heterogeneity, connectivity, and history. *Ecological Complexity* 3: 1 – 12.

CAIN M.L., BOWMAN W.D. & HACKER S.D., 2014. Ecology. 3rd Edition. Sinauer Associates, ISBN-13: 978-0878939084, 596 s.

CALDWELL R. & KAMIONKOWSKI M., 2009. Cosmology: Dark matter and dark energy. *Nature* 458: 587 – 589.

CAMMACK R., ATWOOD T., CAMPBELL P., PARISH H., SMITH A, VELLA F. & STIRLING J. (eds.), 2006. Oxford dictionary of biochemistry and molecular biology; revised edition. Oxford University Press, New York, ISBN 0-19-852917-1, 0-19-852917-1 xv + 720 s.

CAMBRIDGE, 2019. Integrity. Cambridge Dictionary. [online], cit. 2019-11-11, <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/integrity>.

CAPRA F., 1984. The Turning Point: Science and the Rising Culture. William Collins Sons & Co., Glasgow, 516 s.

CAPRA F., 1997. The Web of Life: A new synthesis of Mind and Matter. Hammersmith, London, ISBN 0-00-654751-6, 320 s.

CARDINALE B.J., DUFFY J.E., GONZALES A., HOOPER D.U., PERRINGS CH., VENAIL P., NARWANI A., MACE G.M., TILMAN D., WARDLE D.A., KINZIG A.P., DAILY G.C., LOREAU M., GRACE J.B., LARIGAUDERIE A., SRIVASTAVA D.S. & NAEEM S., 2012. Biodiversity loss and its impacts on humanity. *Nature* 486: 59 – 67.

CARPENTER S. & GUNDERSON L., 2001. Coping with collapse: ecological and social dynamics in ecosystem management. *Bioscience* 51 (6): 451 – 457.

CARSON R., 1962. Silent spring. Houghton Mifflin, New York, ISBN-10: 0618249060, 317 s.

CASTAŇEDA I.S., MULITZA S., SCHEFUβ E., LOPES DOS SANTOS R.A., DAMSTÉ J.S.S. & SCHOUTEN S., 2009. Wet phases in the Sahara/Sahel region and human migration patterns in North Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106: 20159 – 20163.

CBD, 2014. Global Biodiversity Outlook 4. A mid-term assessment of progress towards the implementation of the Strategic Plan for Biodiversity 2011-2020, [online]. cit. 2019-12-20, <https://www.cbd.int/gbo4/>.

CEBECAUEROVÁ M. & LEHOTSKÝ M., 2012. Komplexita ripariálnej zóny – príklad rurálneho segmentu vodného toku Torysa. *Geografický časopis* 64 (2): 133 – 154.

CHAPMAN E.J., CHILDERS D.L. &VALLINO J.J., 2016. How the Second Law of Thermodynamics Has Informed Ecosystem Ecology through its History. *BioScienc*e 66: 27 – 39.

CICES, 2018. Common International Classification of Ecosystem Services. Biodiversity Information system for Europe. [online]. cit. 2019-10-20, <http://biodiversity.europa.eu/maes/common-international-classification-of-ecosystem-services-cices-classification-version-4.3>.

CIECIERSKA H. & KOLADA A., 2014. ESMI: a macrophyte index for assessing the ecological status of lakes. *Environmental Monitoring and Assessment* 186(9): 5501 – 5517 .

CILLIERS P., BIGGS H.C., BLIGNAUT S., CHOLES A.G., HOFMEYR J.-H., JEWITT G.P.W. & ROUX D.J., 2013. Complexity, Modelling and Natural resource Management. *Ecology and Society* 18 (3): 1.

CIRLIG C-C., 2013. Solar energy development in Morocco. Library Briefing 08/05/2013, Library of the European Parliament. 7 s. [online]. cit. 2018-08-20, <http://www.europarl.europa.eu/RegData/bibliotheque/briefing/2013/130515/LDM_BRI(2013)130515_REV1_EN.pdf>.

CLARKE B.L., 1999. Descartes. In: McGreal I.P. (ed.), Velké postavy západního myšlení. Prostor, Praha, s. 239 – 246.

CLARKE J.J., 1993. Nature in question : an anthology of ideas and arguments. Earthscan Publications, London, ISBN 1-85383-182-4, 198 s.

CLAUSSEN M., KUBATZKI C., BROVKIN V., GANOPOLSKI A., HOLEZMANN P. & PACHUR H-J., 1999. Simulation of an abrupt change in Saharan vegetation in the mid-Holocene. *Geophysical Research Letters* 26: 2037 – 2040.

CLEMENTS F.E., 1916. Plant succession, an analysis of the development of vegetation. Publication 242. Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C., USA, 512 s.

COGLEY J.G., 1979. The Albedo of Water as a Function of Latitude. *Monthly Weather Review* 107: 775 – 781.

CONSOLO A. & ELLIS N.R., 2018: Ecological grief as a mental health response to climate change-related loss. *Nature Climate Change* 8: 275 – 281.

CONTRERAS-HERMOSILLA A., 2000. The Underlying Causes of Forest Decline. Center for International Forestry Research, Occasional paper 30: 25 s.

COSTANZA 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: 253 – 260.

COSTANZA R., de GROOT R., SUTTON P., VAN DER PLOEG S., ANDERSON S.J., KUBISYEWSKI I., FARBER S. & TURNER R.K., 2014. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change* 26: 152 – 158.

CORNING P., 1995. Synergy and Self-organization in the evolution of complex systems. *Systems Reserach* 12 (2): 89 – 121.

COTTINGHAM K., 2002. Tackling biocomplexity: the role of people, tools and scale. *BioScience* 52: 793 – 799.

CO_2Earth, 2019. *Earth´s CO_2 home page.* [online], cit. 2019-11-11, https://www.co2.earth/

CRIDDLE R.S., CHURCH J.N., SMITH B.N. & HANSEN L.D., 2003. Fundamental causes of the global patterns of species range and richness. *Russian Journal of Plant Physiology* 50: 192 – 199.

CROSSMAN N.D., BURKHARD B., NEDKOV S., WILLEMEN L., PETZ K., PALOMO I., DRAKOU E.G., MARTÍN-LOPEZ B., MCPHEARSON T., BOYANOVA K., ALKEMADE R., EGOH B., DUNBAR M.B. & MAES J., 2013. A blueprint for mapping and modelling ecosystem services. *Ecosystem Services* 4: 4 – 14.

CUNSOLO A. & ELLIS N.R., 2018. Ecological grief as a mental health response to climate change-related loss. *Nature*

Climate Change 8 (4): 275 – 281.

ČABOUN V., 1997. Ekologická stabilita lesných ekosystémov vzhľadom na ich vývojové štádium. In: Zborník referátov z odborného seminára Racionálne využívanie a obhospodarovanie CHKO-BR Poľana, 5. júl 1997, Zvolen, s. 169 – 172.

ČABOUN V., 2007. New solution and classification of forest functions and the resulting priorities. In: International symposium : Bottlenecks, Solutions, and Priorities in the Context of Functions of Forest Resources, The 150th Anniversary of Forestry Education in Turkey, Istanbul 17-19 October 2007, s. 253 – 261.

ČERMÁK P., MACHAR I. & FILIPPOVÁ J., 2019. Okus dřevin býložravci jako významný faktor ovlivňující společenstvo ptáků v ekosystému lužního lesa. *Zprávy lesnického výzkumu* 64 (1): 16 – 24.

ČERNECKÝ J., GAJDOŠ P., ŠPULEROVÁ J., HALADA Ľ., MEDERLY P., ULRYCH L., ĎURICOVÁ V., ŠVAJDA J., ČERNECKÁ Ľ., ANDRÁŠ P. & RYBANIČ R., 2019. Ecosystems in Slovakia. *Journal of Maps* 16(2): 28 – 35.

ČERNECKÝ J., GAJDOŠ P., ĎURICOVÁ V., ŠPULEROVÁ J., ČERNECKÁ Ľ., ŠVAJDA J., ANDRÁŠ P., ULRYCH L., RYBANIČ R. & POVAŽAN R., 2020. Hodnota ekosystémov a ich služieb na Slovensku. ŠOP SR, Banská Bystrica, ISBN 978-80-8184-078-4, 166 s.

DAILY G.C., ALEXANDER S., EHRLICH P.R., GOULDER L., LUBCHENCO J., MATSON P.A., MOONEY H.A., POSTEL S., SCHNEIDER S.H., TILMAN D. & WOODWELL G.M., 2002. Ecosystem services: Benefits Supplied to Human Society by Natural Ecosystems. Public Affairs Office, Ecological Society of America, Washington, 20 s. [online], cit 2016-10-10, <http://ecology.org/biod/Ecosystem.Services.html>.

DAISIE, 2019. Aliens by Group. Delivering Alien Invasive Species Inventories for Europe. [online], cit. 25-01_2019, <http://www.europe-aliens.org/europeSummary.do>.

DALY H., 2008: Towards a Steady-State Economy. The Oil Drum. Discussions about energy and our future. [online], cit. 2015-12-15, <http://www.theoildrum.com/node/3941>.

DANIELSEN F., BEUKEMA H., BURGESS N.D., PARISH F., BRÜHL C.A., DONALD P.F., MURDIYARSO D., PHALAN B., REIJNDERS L., STRUEBIG M. & FITZHERBERT E. ., 2009. Biofuel plantations on forested lands: double jeopardy for biodiversity and climate. *Conservation Biology* 23: 348 – 358.

DARWIN C.R., 1859. On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life. John Murray, London, 502 s.

DAVIES R.D., 2013. Appraising Weak and Strong Sustainability: Searching for a Middle Ground. *Consilience: The Journal of Sustainable Development* 10 (1): 111 – 124.

DAWKINS R., 1998. Sobecký gen. Mladá Fronta, Praha, ISBN 80-204-0730-8, 319 s.

DEFOLIART G., 1992. Insects as Human Food. Gene DeFoliart discusses some nutritional and economic aspetcs. *Crop Protection* 11 (5): 395 – 399.

DEFOLIART G., 1999. Insetcts as Food: Why the Western attitude is important. *Annual Review of Entomology* 44: 21 – 50.

DENMAN K.L., BRASSEUR G., CHIDTHAISONG A., CIAIS P., COX P.M., DICKINSON R.E., HAUGLUSTAINE D., HEINZE CH., HOLLAND E., JACOB D., LOHMANN U., RAMACHANDRAN S., DA SILVA DIAS L.T., WOFSY S.C. & ZHANG X., 2007. Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M. & Miller H.L. (eds.), Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. [online], cit 2018-10-10, <https://www.globalcarbonproject.org/global/pdf/AR4WG1_Pub_Ch07.pdf>.

DESCARTES R., 1992. Rozprava o metodě. Nakladatelství Svoboda, Praha, 79 s.

DES JARDINS J.R., 2001. Environmental Ethics: An Introduction to Environmental Philosophy. 3rd Ed. Wadsworth /Thomson Learning, Belmont CA, ISBN 0-534-51966-0, 277 s.

DESROCHERS R.E. & ANAND M., 2005. Quantifying the components of biocomplexity along ecological perturbation gradients. *Biodiversity and Conservation* 14: 3437 – 3455.

DEMEK J., 1999. Úvod do krajinné ekologie. Prírodovědecká fakulta University Palackého v Olomouci, Olomouc, ISBN 80-7067-973-5, 102 s.

DEMO M., HRONEC O. & TÓTHOVÁ M. et al., 2007. Udržateľný rozvoj : Život v medziach únosnej kapacity biosféry. SPU v Nitre, Nitra, ISBN 978-80-8069-826-3, 437 s.

DENMAN K.L., BRASSEUR G., CHIDTHAISONG A., CIAIS P., COX P.M., DICKINSON R.E., HAUGLUSTAINE D., HEINZE C., HOLLAND E., JACOB D., LOHMANN U., RAMACHANDRAN S., DA SILVA DIAS P.L., WOFSY S.C. & ZHANG X., 2007. Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, UK, s. 499 – 507.

DHAR M., PARROTT L. & HAWKINS CH.D.B., 2016. Aftermath of Mountain Pine Beetle Outbreak in British Columbia: Stand Dynamics, Management Response and Ecosystem Resilience. *Forests* 7 (8): 171 – 189 s.

DIAMOND J., 2002. Evolution, consequences and future of plant and animal domestification. *Nature* 418: 700 – 707.

DIAMOND J., 2008. Kolaps. Proč společnosti přežívají či zanikají. Academia, Praha, ISBN 978-80-200-1589-1, 752 s.

DÍAZ S., SETTELE J., BRONDÍZIO E.S., NGO H.T., AGARD J., ARNETH A., BALVANERA P., BRAUMAN K.A., BUTCHART S.H.M., CHAN K.M.A., GARIBALDI L.A., ICHII K., LIU J., SUBRAMANIAN S.M., MIDGLEY G.F., MILOSLAVICH P., MOLNÁR Z., OBURA D., PFAFF A., POLASKY S., PURVIS A., RAZZAQUE J., REYERS B., CHOWDHURY R.R., SHIN Y-J., VISSEREN-HAMAKERS I, WILLIS K.J. & ZAYAS C.N., 2019. Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science* 366 (6471): eaax3100, 10 s.

DICKMAN CH., 2020. More than one billion animals killed in Australian bushfires. The University of Sydney, 8. január 2020, [online], cit. 2020-10-1, <https://sydney.edu.au/news-opinion/news/2020/01/08/australian-bushfires-more-than-one-billion-animals-impacted.html>.

DITLEVSEN P.D., 2009. Bifurcation structure and noise-assisted transitions in the Pleistocene glacial cycles. *Paleoceanography* 24: PA3204, 11 s.

DOBOŠOVÁ A., 2002. Hole Národného parku Malá Fatra, aká je budúcnosť (pohľad botanika)? *Oecologia Montana* 11: 36 – 37.

DRACK M., APFALTER W. & POUREAU D., 2007. On the making of a system theory of life: Paul A Weiss and Ludwig von Bertalanffy´s conceptual connection. *The Quaterly Review of Biology* 82 (4): 349 – 373.

DRDOŠ J., URBÁNEK J. & MAZÚR E., 1980. Landscape Syntheses and Their Role in Solving the Problems of Environment. *Geografický časopis* 32: 119 – 129.

DRDOŠ J. & MICHAELI E., 2001. Geoekológia a environmentalistika, II. časť, Environmentálne plánovanie. Fakulta humanitných a prírodných vied, Prešovská univerzita, Prešov, ISBN 80-8068-027-2, 203 s.

DUPRAZ P. & GUYOMARD H., 2019. Environment and Climate in the Common Agricultural Policy. *EuroChoices* 18 (1): 18 – 25.

DURRER R., 2008. The Cosmic Microwave Background: The history of its experimental investigation and its signicance for cosmology. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 47 s.

DUVIGNEAUD P., 1988. Ekologická syntéza. Academia, Praha, 414 s.

EC, 2018. Trends in the EU Agricultural Land Within 2015-2030. European Commission, European Union. [online], cit. 2019-10-10, <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/trends-eu-agricultural-land-within-2015-2030>.

EC, 2020. EU Circular Economy Action plan. European Commission. Environment. [online], cit. 2020-06-10, <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/>.

ECCC, 2017. Canadian Environmental Sustainability Indicators: Ecological integrity of national parks. Environment and Climate Change Canada. [online], cit. 2019-12-12,

<https://www.canada.ca/content/dam/eccc/documents/pdf/cesindicators/ecological-integrity-of-national-parks/EcologicalIntegrityNP_EN.pdf>.

EEA, 2003. Europe´s environment: the third assesment. European Environment Agency, 2003. Copenhagen, Denmark, ISBN 92-9167-574-1, 312 s.

EEA, 2012. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012. European Environment Agency, Luxembourg, ISBN 978-92-9213-346-7, 300 s.

EEA, 2014. Water use in Europe – Quantity and quality face big challenges. European Environment Agency, [online], cit. 2019-10-10, <https://www.eea.europa.eu/downloads/7b7949a9c509441ba76fa1e4e726412d/1575969755/water-use-in-europe-2014.pdf>.

EEA, 2017. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. European Environment Agency, Luxembourg, ISBN 978-92-9213-836-3, 419 s.

EEA, 2019. The European environment – state and otlook 2020. European Environment Agency, Copenhagen, ISBN

978-92-9480-090-9, 496 s. [online], cit. 2020-02-02, <https://www.eea.europa.eu/publications/soer-2020>.

EEA 2020. Ecological footprint by land type in Europe, 1961-2016. European Environment Agency, Copenhagen, [online], cit. 2019-10-10, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/ecological-footprint-time-series-by-land-2#tab-chart_1>.

EHRLICH P.R. & EHRLICH A.H., 1992. Healing the Planet. Addison-Wesley Publishing Company, New York, USA, ISBN 0-201-63224-1, 366 s.

EISELTOVÁ M., POKORNÝ J., HESSLEROVÁ P. & RIPL W., 2012. Evapotranspiration – a driving force in landscape sustainability. In: Irmak A. (ed.): Evapotranspiration – Remote Sensing and Modeling. InTech Europe, Croatia, ISBN 978-953-307-808-3, 514 s.

EKINS P., HILLMAN M. & HUTCHINSON R., 1992. Wealth Beyond Measure, An Atlas of New Economics, GAIA Books Ltd., London, ISBN 1-85675-050-7, 192 s.

EKINS P., FOLKE C. & DE GROOT R., 2003. Indetifying critical natural capital. *Ecological Economics* 44: 159 – 163.

ELIÁŠ P., 2000. Ochrana biodiverzity. Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, Nitra, ISBN 80-7137-680-9, 74 s.

ELIÁŠ P., 2002. Zdravie ekosystémov: uplatnenie koncepcie zdravia v ekológii? *Životné prostredie* 36 (3): 146 – 149.

ELIÁŠ P., 2007. Ekológia. Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, Nitra, ISBN 80-8069-271-8, 262 s.

ELIÁŠ P. jun., DÍTĚ D., KLIMENT J., HRIVNÁK R. & FERÁKOVÁ V., 2015. Red list of ferns and flowering plants of Slovakia, 5th edition (October 2014)*, Electronic Apendix 1. *Biologia* 70 (2): 218 – 228.

ELLISON D., MORRIS C.E., LOCATELLI B., SHEIL D., COHEN J., MURDIYARSO D., GUTIERREZ V., VAN NOORDWIJK M., CREED I.F., POKORNY J., GAVEAU D., SPRACKLEN D.V., TOBELLA A.B., ILSTEDT U., TEULING A.J., GEBREHIWOT S.G., SANDS D.C., MUYS B., VERBIST B., SPRINGGAY E., SUGANDI Y. & SULLIVAN C.A., 2017. Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change* 43: 51 – 61.

ELTON CH.S., 1927. Animal Ecology. Text Books of Animal Biology. The MacMillan Company, New York, 207 s, [online], cit. 2018-12-15, <https://ia700301.us.archive.org/7/items/animalecology00elto/animalecology00elto.pdf>.

ELTON CH.S., 1935. Fluctuations in animal populations. *Quarterly Journal of Forestry* 29: 194 – 198.

ELTON CH.S., 1958. The ecology of invasions by animals and plants. Methuen, London, 181 s.

ENERGOPORTÁL, 2020. Jednotky a prevody. Priatelia Zeme – CEPA. [online], cit. 2020-06-10, **<**https://energoportal.org/jednotky-a-prevody>.

ENGLER R., RANDIN CH.F., THUILLER W., DULLINGER S., ZIMMERMANN N.E., ARAÚJO M.B., PEARMAN P.B., LE LAY G., PIEDALLU Ch., ALBERT C.H., CHOLER P., COLDEA G., De LAMO X., DIRNBÖCK T., GÉGOUT J.-C., GÓMEZ-GARCÍA D., GRYTNES J.-A., HEEGAARD E., HØISTAD F., NOGUÉS-BRAVO D., NORMAND S., PUŞCAŞ M., SEBASTIÀ M.-T., STANISCI A., THEURILLAT J.-P., TRIVEDI M.R., VITTOZ P. & GUISAN A., 2011. 21st century climate change threatens mountain flora unequally across Europe. *Global Change Biology* 17 (7): 2330 – 2341.

ENVIROPORTÁL, 2019. Parížska globálna klimatická dohoda. Slovenská agentúra životného prostredia. [online], cit. 2020-6-10, <https://www.enviroportal.sk/uploads/scoredocument/61.pdf>.

EPA, 2020. Greenhouse Gas Emmissions, Understanding Global Warming Potentials. United States Environmental Protection Agency. [online], cit. 2020-06-10, <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>.

ESDAC, 2020. Global Soil Erosion. European Commission, European Soil Data Centre (ESDAC), [online], cit. 10-4-2020, <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/global-soil-erosion>.

EU, 2013. Rozhodnutie Európskeho parlamentu a Rady č. 1386/2013/EÚ z 20. novembra 2013 o všeobecnom environmentálnom akčnom programe Únie do roku 2020 „Dobrý život v rámci možností našej planéty" Text s významom pre EHP, 28.12.2013. Úradný vestník Európskej únie, L 354: 171 – 200.

EU SCIENCE HUB, 2019. EU ecosystem services valued at almost €125 billion a year. European Commission, 2019. [online], cit. 2019-12-15, <https://ec.europa.eu/jrc/en/science-update/eu-ecosystem-services-valued-almost-125-billion-year>.

FA J.E., OLIVERO J., REAL R., FARFÁN M., MÁRQUEZ A.L., VARGAS M., ZIEGLER S., WEGMANN M., BROWN D., MARGETTS B. & NASI R., 2015. Disentangling the relative effects of bushmeat availability on human nutritionin in central Africa. Scientific Reports 15: 8168. [online], cit. 2020-06-10, <https://www.nature.com/articles/srep08168.pdf>.

FABER-LANGENDOEN D., ROCCHIO J., SCHAFALE M., NORDMAN C., PYNE M., TEAGUE J., FOTI T. & COMER P., 2006. Ecological Integrity Assessment and Performance Measures for Wetland Mitigation. Final Report, March 15, 2006.

NatureServe, Arlington, VA, 45 s. [online], cit. 2019-12-15, <https://mountainscholar.org/bitstream/handle/10217/46998/EIA_Perf_Meas_Wetland_Mitigation_2006.pdf?sequence=1>.

FABER-LANGENDOEN D., HEDGE C., KOST M., THOMAS S., SMART L., SMYTH R., DRAKE J. & MENARD S., 2012a. Assessment of wetland ecosystem condition across landscape regions: A multi-metric approach. Part A. Ecological Integrity Assessment overview and field study in Michigan and Indiana. EPA/600/R-12/021a. U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington, DC.

FABER-LANGENDOEN D., ROCCHIO J., THOMAS S., KOST M., HEDGE C., NICHOLS B., WALZ K., KITTEL G., MENARD S., DRAKE J. & MULDAVIN E., 2012b. Assessment of wetland ecosystem condition across landscape regions: A multi-metric approach. Part B. Ecological Integrity Assessment protocols for rapid field methods (L2). EPA/600/R-12/021b. U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington, DC.

FAITH D.P., MINCHIN P.R. & BELBIN L., 1987. Compositional dissimilarity as a robust measure of ecological distance. *Vegetatio* 69: 57 – 68.

FAO, 2017. FAOSTAT database. [online], cit. 2019-12-15, <http://faostat.fao.org>.

FAO, 2019a. The state of food security and nutrition in the World. Safeguarding against economic slowdowns and downturns. Food and Agriculture organization (FAO), International Fund for Agricultural Development (IFAD), United Nations Children's Fund (UNICEF), World Food Programme (WFP) & World Health Organization (WHO), Rome, ISBN 978-92-5-131570-5, 212 s. [online], cit. 2019-12-15, <http://www.fao.org/3/ca5162en/ca5162en.pdf>.

FAO, 2019b. The State of the World´s Biodiversity for Food and Agriculture. Food and Agriculture Organization, Rome, ISBN 978-92-5-131270-4, 572 s.

FARGIONE J., HILL J., TILMAN D., POLASKY S. & HAWTHORNE P., 2008. Land Clearing and Biofuel Carbon Debt. *Science* 319 (5867): 1235 – 1238.

FATH B.D., 2014. Sustainable systems promote wholeness-extending transformations: The contribution of systems thinking. *Ecological Modelling* 293: 42 – 48.

FEYNMAN R.P., 1965. The Character of Physical Law. The M.I.T. Press , Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts, and London, England, ISBN 0262060167, 173 s.

FIKSEL J., 2006. Sustainability and resilience: toward a systems approach. *Sustainability: Science, Practice, & Policy* 2(2): 14 – 21.

FISHER D.N. & PRUITT J.N., 2020. Insights from the study of complex systems for the ecology and evolution of animal populations. *Current Zoology* 66 (1): 1 – 14.

FLETCHER R.J., DIDHAM R.K., BANKS-LEITE C., BARLOW J., EWERS R.M., ROSINDELL J., HOLT R.D., GONZALES A., PARDINI R., DAMSCHEN E.I., MELO F.P.L., RIES L., PREVEDELLO J.A., TSCHARNTKE T., LAURANCE W.F., LOVEJOY T. & HADDAD N.M., 2018. Is habitat fragmentation good for biodiversity? *Biological Conservation* 226: 9 – 15.

FORESTPORTAL, 2020. Ekológia a monitoring lesa. [online], cit. 2020-05-30, <http://www.forestportal.sk/lesne-hospodarstvo/ekologia-a-monitoring-lesa/Stranky/default.aspx>.

FRANC V., MALINA R. & ŠKODOVÁ M., 2015. Základy biogeografie a ekológie, Vydavateľstvo Univerzity Mateja Bela – Belianum, Banská Bystrica, ISBN 978-80-557-0891-1, 174 s.

FRANKLIN J.F., MITCHELL R.J. & PALIK B.J., 2007. Natural disturbance and stand develop-ment principles for ecological forestry. Gen. Tech. Rep. NRS-19. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station, 44 s.

FRASER P. & BICKMORE W., 2007. Nuclear organization of the genome and the potential for gene regulation. *Nature* 447 (7143): 413 – 417.

FSC, 2019. FSC: A Tool to Implement the Sustainable Development. [online], cit. 2020-01-30, <https://fsc.org/en/page/sustainable-development-goals>.: 341

FSC, 2018. FSC Facts & Figures. Forest Stewardship Council, 12 s. [online], cit. 2020-03-10, <https://fsc.org/en/page/sustainable-development-goals>.

FUNTOWICZ S. & RAVETZ J.R., 1993. Science for the post-normal age. *Futures* 25: 735 – 755.

FUNTOWICZ S. & RAVETZ J.R., 2003. Post-Normal Science. International Society for Ecological Economics. [online], cit.

2020-06-10, <http://isecoeco.org/pdf/pstnormsc.pdf>.

FŰZYOVÁ Ľ., LÁNIKOVÁ D. & NOVOROLSKÝ M., 2009. Economic valuation of Tatras national park and regional environmental policy. *Polish Journal of environmental studies* 18 (5): 811 – 818.

GARAMVÖLGYI Á. & HUFNAGEL L., 2013. Impacts of climate change on vegetation distribution No 1: Climate change induced vegetation shifts in the palearctic region. *Applied Ecology and Environmental Research* 11 (1): 79 – 122.

GETZNER M., 2009. Economic and cultural values related to Protected Areas. Part A: Valuation of Ecosystem Services in Tatra (PL) and Slovensky Raj (SK) national parks. Final report, 57 s.

GAO Y., SKUTSCH M., MASERA O. & PACHECO P., 2011. A global analysis of deforestation due to biofuel development. Working Paper 68. Bogor, Indonesia: CIFOR, 100 s.

GFN, 2020. Ecological Footprint Explorer. Global Footprint Network. [online], cit. 2020-01-30, <https://data.footprintnetwork.org/#/>.

GHAZOU J., BURIVALOVA Z., GARCIA-ULLOA J. & KING L.A., 2017. Conceptualizing forest degradation. *Trends in Ecology* & *Evolution* 30 (10): 622 – 632.

GODDARD-TAYLOR G., 2012. The Trailblazer. The life and times of Rachel Carson. *Sanctuary, The Journal of Massachusets Audubon Society,* Spring 2012, 50 (2): 4 – 6.

GOETHE J.W., 1982. O prírode a umení. Pravda, Bratislava, ISBN 75-085-82, 331 s.

GOLDSMITH E., ALLEN R., ALLABY M., DAVOLL J. & LAWRENCE S., 1972. A Blueprint for survival. *The Ecologist* 2 (1): 139 s.

GOLDSMITH E., 1996. The Way: An Ecological World - View. Themis Books, Dartington, Devon, ISBN 0-9527302-3-5, 553 s.

GONZALES P., NEILSON R.P., LENIHAN J.M. & DRAPEK R. J., 2010. Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shift due to climate change. *Global Ecology & Biogeography*, 19: 755 – 768.

GOODLAND R., 2008. The Institutionalized Use of Force in Economic Development: With pecial Reference to the World Bank. In: Soskolne C.L., Westra L., Kotzé L.J., Mackey B., Rees W.E. & Westra R. (eds.), Sustaining Life on Earth. Lexington Books, Lanham, ISBN 978-0-7391-1730-9, s. 339 – 353.

GOOLD H.D., WRIGHT P. & HAILSTONES D., 2018. Emerging Opportunities for Synthetic Biology in Agriculture. *Genes* 9 (7): 341.

GORDON A. & SUZUKI D., 1994. Jde o přežití, Baroko a Fox, Beroun, ISBN 80-85642-10-7, 251 s.

GORENSTEIN P. & TUCKER W., 2014. Astronomical Signatures of Dark Matter. *Advances in High Energy Physics*, 2014: Article ID 878203, 10 s. [online], cit. 2008-09-10, <https://www.hindawi.com/journals/ahep/2014/878203/>.

GRANADOS A.T., IONIDES E.L. & CARPINTERO O., 2012. Climate change and the world economy: short-run determinants of atmospheric CO_2. *Environmental Science & Policy* 21 (: 50 – 62.

GREAT APE TRUST OF IOWA, 2008. Wild Orangutans Declining More Sharply In Sumatra And Borneo Than Thought. *Science Daily*, 6 July 2008. [online], cit. 2010-01-01, <http://www.sciencedaily.com/releases/2008/07/080703113628.htm>.

GRIGGS D., STAFFORD-SMITH M., GAFFNEY O., ROCKSTRÖM J., OHMAN M.C., SHYAMSUNDAR M., STEFFEN W., GLASER G., KANIE N. & NOBLE I., 2013. Policy: Sustainable development goals for people and planet. *Nature* 495: 305 – 307.

de GROOT R.S., 1992. The Functions of Nature: Evaluation of nature in environmental planning, management and decision making. Marion Boyars Publishers, London, UK, ISBN 9001 35594 3, 315 s.

de GROOT R.S., WILSON M.A. & BOUMANS R.M.J., 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* 41 (3): 393 – 408.

de GROOT R.S., ALKEMADE R., BRAAT L., HEIN L. & WILLEMEN L., 2010. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity* 7 (3): 260 – 272.

GUERRERO-BOSAGNA C. & SKINNER M.K., 2010. Transgenerational epigenetic actions of environmental compounds. *Animal Reproduction* 7 (3): 165 – 167.

GUNDERSON L.H. & HOLLING C.S. (eds.), 2009. Panarchy. Understanding Transformations in Human and Natural Systems. Island Press, ISBN 9781559638579, 450 s.

GÜNTHER F. & FOLKE C., 1993. Characteristics of Nested Living Systems. *Journal of Biological Systems* 1 (3): 257 – 274.

GYFTOPOULOS E. & BERETTA G.P., 2005. Thermodynamics: Foundations and Applications. Dover Publications, New York, USA, ISBN-10: 0486439321, 756 s.

HAECKEL E.H.P.A., 1866. Generelle Morphologie der Organismen. Allgemeine Grundzüge der organischen Formen-Wissenschaft, mechanische Begründet durch die von Charles Darwin reformirte Descendenz-Theorie. Volume I: Allgemeine Anatomie der Organismen. 32 + 574 s.; volume II: Alllgemeine Entwickelungsgeschichte der Organismen. Georg Reimer, Berlin, Germany, 140 + 462 s.

HANSEN J., 2009. Storms of My Grandchildren: The Truth about Coming Climate Catastrophe and Our Last Chance to Save Humanity. Bloomsbury Publishing, USA, ISBN-10: 1608195023, 336 s.

HARRIS F. (ed.), 2004. Global environmental issues. John Wiley & Sns Inc., Hoboken, USA, ISBN 0-470-84561-9, 324 s.

HÄYHÄ T. & FRANZESE P.P., 2014. Ecosystem services assessment: A review under an ecological-economic and systems perspective. *Ecological Modelling* 289: 124 – 132.

HECHT A.D., FIKSEL J., FULTON S.C., YOSIE T.F., HAWKINS N.C., LEUENBERGER H., GOLDEN J.S. & LOVEJOY T.E., 2012. Creating the future we want. *Sustainability: Science, Practice, & Policy (e-Journal)* 8(2): 62 – 75.

HEYLIGHEN F., 1989. Self-organization, emergence and the architecture of complexity. In: Proceedings of the 1st European Conference on System Science. AFCET, Paris, s. 23 – 32. [online], cit. 2020-05-15, <http://pcp.vub.ac.be/Papers/SelfArchCom.pdf>.

HEYLIGHEN F., 1999. The growth of structural and functional complexity during evolution. In: Heylighen F., Bollen J. & Riegler A. (eds.). The evolution of complexity. Kluwer Academic, Dordrecht, s. 17 – 44.

HEJDA M., CHYTRÝ M. & PYŠEK P., 2018. Biotopy jako zdroje i příjemci nepůvodních druhů rostlin. *Živa* LXVI (5): 218 – 220.

HESSLEROVÁ P. & POKORNÝ J., 2010. The synergy of solar radiation, plant biomass, and humidity as an indicator of ecological functions of the landscape: A case study from Central Europe. *Integrated Environmental Assessment and Management* 6 (2): 249 – 259.

HLÁSNY T., SITKOVÁ Z., BOŠEĽA M., ZÚBRIK M., TROMBIK J., BARKA I., LONGAUER R., DOBOR L., BARCZA Z., FABRIKA M. & SEDMÁK R., 2012: Zmena klímy a lesy Slovenska: možné dopady, adaptácia a odporúčania pre prax. NLC, Zvolen, 75 s.

HLÁSNY T., TROMBÍK J., BOŠEĽA M., MERGANIČ J., MARUŠÁK R., ŠEBEŇ V., ŠTĚPÁNEK P., KUBIŠTA J. & TRNKA M. 2016: Climatic drivers of forest productivity in Central Europe. *Agricultural and Forest Meteorology* 234-235 (15): 258 – 273.

HOBSON P. & IBISCH P.I., 2010. An alternative conceptual framework for sustainability: systemics and thermodynamics. In: Ibisch P.I, Vega A.E. & Herrmann T.M. (eds.): Interdependence of biodiversity and development under global change. Technical Series No. 54, Secretariat on The Convention on Biological Diversity, Montreal (2nd edition), s. 127 – 148.

HOCHBERG M., 2016. Renewable Energy Growth in Morocco, An Example for the Region. MEI Policy Focus 2016-26, Middle East Institute, Policy Focus Series. [online], cit. 2017-10-10, <https://www.mei.edu/sites/default/files/publications/PF26_Hochberg_Moroccorenewables_web.pdf>.

HOLLING C.S., 2001. Understanding the Complexity of Economic, Ecological and Social Systems. *Ecosystems* 4: 390 – 405.

HOLLING C.S., 2004. From Complex Regions to Complex Worlds. *Ecology and Society* 9 (1): 11

HOPWOOD J., CODE A., VAUGHAN M., BIDDINGER D., SHEPHERD M., BLACK S.H., LEE-MADER E. & MAZZACANO C., 2016. How Neonicotinoids Can Kill Bees: The Science Behind the Role These Insecticides Play in Harming Bees. 2nd Edition. The Xerces Society for Invertebrate Conservation, Portland, 76 s.

HOUGHTON J., 1998. Globální oteplování. Academia Praha, ISBN 80-200-0636-2, 228 s.

HOUSKA J., 2007. *Reynoutria japonica* Houtt – křídlatka japonská / pohánkovec japonský. [online], cit. 2019-10-10, <https://botany.cz/cs/reynoutria-japonica/>.

HRVOĽ J. & TOMLAIN J., 1997. Žiarenie v atmosfére. Matematicko-fyzikálna fakulta Univerzity Komenského, Bratislava, 134 s.

HUBA M.,1988. K hľadaniu miery únosnosti a efektívnosti využívania krajiny CHKO Malá Fatra a jej ochranného pásma. In: Vplyv ľudských aktivít na prírodu chránenej krajinnej oblasti Malá Fatra. Zborník zo seminára. ÚŠOP Správa CHKO Malá Fatra v Gbeľanoch, s. 39 – 45.

HUBA M., 2006. Trvalo udržateľný rozvj spoločnosti ako predmet výskumu ne geografickom ústave SAV. *Geografický časopis* 58 (4): 329 – 351.

HUSSAIN A., RORIGUEZ-RAMOS J.C. & ERBILGIN N., 2019. Spatial characteristics of volatile communication in lodgepole pine trees: Evidence of Kin recognition and intra-species support. *Science of the Total Environment* 692: 127 – 135.

HUTCHINSON G.E., 1957. Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology* 22: 415 – 427.

CHAPIN F.S., MATSON P.A. & MOONEY, H.A., 2002. Principles of terrestrial ecosystem ecology. Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, ISBN 0-387-95443-0, 455 s.

CHIARUCCI A., BACARO G. & SCHEINER S.M., 2011. Old and new challenges in using species diversity for assessing biodiversity. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 366: 2426 – 2437.

CHOWN M., 2004. Chaotic Heavens. *New Scientist* 181 (2436): 32 – 35.

IFOAM, 2008. Definition of Organic Agriclture. International Federation of Organic Agriculture Movement. [online], cit. 2019-12-15, <https://www.ifoam.bio/why-organic/organic-landmarks/definition-organic>.

IFOAM, 2020. The Four Principles of Organic Agriculture. IFOAM Organics International. [online], cit. 2019-12-12, <https://www.ifoam.bio/why-organic/shaping-agriculture/four-principles-organic>.

INGER R., GREGORY R., DUFFY J.P., STOTT I., VOŘÍŠEK P. & GASTON K.J., 2015. Common European birds are declining rapidly while less abundant species' numbers are rising. *Ecology Letters* 18: 28 – 36.

INSENRING R., 2010: Pesticides and the loss of biodiversity. Pesticides Action Network Europe, London, 25 s. [online], cit. 15-12-2019, <https://www.pan-europe.info/old/Resources/Briefings/Pesticides_and_the_loss_of_biodiversity.pdf>.

IPBES / DÍAZ S., SETTELE J., BRONDÍZIO E., NGO H.T., GUÈZE M., AGARD J., ARNETH A., BALVANERA P., BRAUMAN K., BUTCHART S., CHAN K., GARIBALDI L., ICHII K., LIU J., SUBRAMANIAN S.M., MIDGLEY G., MILOSLAVICH P., MOLNÁR Z., OBURA D., PFAFF A., POLASKY S., PURVIS A., RAZZAQUE J., REYERS B., CHOWDHURY R.R., SHIN Y.-J., VISSEREN-HAMAKERS I., WILLIS K. & ZAYAS C., 2019. Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services - Summary for Policymakers. The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. [online], cit. 2020-6-10, <https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/summary_for_policymakers_ipbes_global_assessment.pdf>.

IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. In: Solomon S., Qin D., Manning M., Marquis M., Averyt K., Tignor M., Miller H. & Chen Z. (eds.): Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, New York, NY, USA, ISBN 978-0-521-88009-1, 996 s. [online], cit. 2019-12-15, <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf>.

IPCC, 2013. Climate Change 2013: the Physical Science Basis. In: Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. & Midgley P.M. (eds.): Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, , ISBN 978-1-107-05799-1, 1535 s. [online], cit. 2019-10-15, <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/#.UtzK-fs1UsY>.

IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. In: Core Writing Team, Pachauri R.K. & Meyer L.A. (eds.): Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, ISBN 978-92-9169-, 143-2, 151 s. [online], cit. 2019-10-15, <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf>.

IPCC, 2018. Global Warming of 1,5 °C: Summary for Policymakers. In: Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H.O., Roberts D., Skea J., Shukla P.R., Pirani A., Moufouma-Okia W., Péan C., Pidcock R., Connors S., Matthews J.B.R., Chen Y., Zhou X., Gomis M.I., Lonnoy E., Maycock T., Tignor M. & Waterfield T. (eds.): An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 s. ISBN 978-92-9169-151-7, 26 s. [online], cit. 2019-10-15, <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/summary-for-policy-makers/>.

IPCC, 2019: Climate Chane and Land. Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: Shukla P.R., Skea J., Buendia E.C., Masson-Delmotte V., Pörtner H. – O., Roberts D.C., Zhai P., Slade R., Connors S., van Diemen R., Ferrat M., Haughey E., Luz S., Neogi S., Pathak M., Petzold J., Pereira J.P., Vyas P., Huntley E., Kissick K., Belkacemi M. & Malley J. (eds.), 2019. an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems, 41 s., [online], cit. 2019-12-15, <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SPM_Updated-Jan20.pdf>.

IUCN, 2019. IUCN RedList of Threatened Species. Version 2019.1. Summary statistic., [online], cit. 2019-12-12, <https://www.iucnredlist.org/resources/summary-statistics>.

IUCN, 2020. IUCN RedList of Threatened Species. Version 2020.1. Summary statistics. [online], cit. 2020-0505,

<https://www.iucnredlist.org/resources/summary-statistics>.

IUCN, UNEP & WWF, 1980. World Conservation Strategy. [online], cit. 2019-12-12, <https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/wcs-004.pdf>.

IUCN, UNEP & WWF, 1991. Caring for the Earth, A strategy for sustainable living. Gland, Switzerland, ISBN 2-8317-0074-4, 228 s.

IVANIČKA K., 1997. Základy synergetiky. Univerzita Mateja Bela v Banskej Bystrici, Banská Bystrica, ISBN 80-8055-076-X, 173 s.

IZAKOVIČOVÁ Z., MIKLÓS L. & DRDOŠ J., 1997. Krajinnoekologické podmienky trvalo udržateľného rozvoja, Veda, Bratislava, ISBN 80-224-0485-3, 183 s.

JACKOWIAK B., 1998. The hemeroby concept in the evaluation of human influence on the urban flora of Vienna. *Phytocoenosis* 10: 79 – 96.

JACOBY R., PEUKERT M., SUCCURRO A., KOPRIVOVA A. & KOPRIVA S., 2017. The Role of Soil Microorganisms in Plant Mineral Nutrition – Current Knowledge and Future Directions. *Frontiers in Plant Science* 8, Article 1617: 19 s.

JAKÁL J., 1998. Extrémne geomorfologické procesy ako geomorfologické živly. *Folia Geographica* 2: 297 – 304.

JANČURA P. & BOHÁLOVÁ I., 2001. Identita človeka a krajiny. In: Zborník zo VII. Celoslovenskej konferencie Krajina – Človek – Kultúra, SAŽP, Banská Bystrica, s. 43 – 55.

des JARDINS J.R., 2001. An introduction to environmental ethics, Wadsworth/Thomson Learning, Belmont CA, ISBN 0-534-51966-0, 277 s.

JAROLÍMEK I. & HROUDA L., 2019. Výškové vegetačné stupne. Príloha 3 k Malej flóre Slovenska – Určovací kľúč cievnatých rastlín. Msc. 1 s. [Depon in Botanický ústav CBRB SAV v Bratislave].

JELÍNKOVÁ J., PLESNÍK J. & UCOVÁ S., 2015. Lovem k ochraně? Fakta, lži, polopravdy a mýty. *Ochrana přírody* 4: 15 – 19.

JENSEN D., 2006. Endgame, volume I: The end of civilization, volume II: Resistance, ISBN 978-1-58322-730-5, ISBN 978-1-58322-724-4, 931 s.

JEŽÍK M., BLAŽENEC M., LETTS M.G., DITMAROVÁ Ľ., SITKOVÁ Z. & STŘELCOVÁ K., 2015: Assessing seasonal drought stress response in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) by monitoring stem circumference and sap flow. *Ecohydrology* 8(3): 378 – 386.

JONGMAN R. & PUNGETTI G. (eds.), 2004. Ecological Networks and Greenways, Concepts, Design, Implementation. Cambridge University Press, Cambridge, ISBN 0521535026, 368 s.

JØRGENSEN S.E., 2012. Introduction to Systems Ecology. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA, ISBN 978-1-4398-5501-0, 320 s.

JØRGENSEN S.E. & SVIREZHEV Y.M., 2004. Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems. Elsevier, Oxford, United Kingdom, ISBN 0-08-044166-1, 366 s.

JØRGENSEN S.E., FATH B.D., BASTIANOVI S., MARQUES J.C., MÜLLER F., NIELSEN S.N., PATTEN B., TIEZZI E. & ULANOWICZ R.E., 2007. A New Ecology. Systems Perspective. Elsevier, Oxford, UK, Amsterdam, The Netherlands, ISBN 978-0-444-53160-5, 275 s.

JOST L., 2006. Entropy and diversity. *Oikos* 113: 363 – 375.

JURKO A., 1990. Ekologické a socioekonomické hodnotenie vegetácie. Príroda, Bratislava, 195 s.

KANDZIORA M., BURKHARD B. & MÜLLER F., 2013. Mapping provisioning ecosystem services at the local scale using data of varying spatial and temporal resolution. *Ecosystem Services* 4: 47 – 59.

KANIANSKA R., JAĎUDOVÁ J., MAKOVNÍKOVÁ J., KIZEKOVÁ M. & TOMAŠKIN J., 2016. Ekosystémové služby. Vydavateľstvo Univerzity Mateja Bela – Belianum, Banská Bystrica, ISBN 978-80-557-1129-4, 243 s.

KARR J.R., 1991. Biological integrity: A long-neglected aspect of water resource management. *Ecological Applications* 1: 66 – 84.

KARR J.R., 1998. Rivers as sentinels: Using the biology of rivers to guide landscape management. In: Bilby R.E. & Naiman R J. (eds.): The Ecology and Management of Streams and Rivers in the Pacific Nortwest Coastal Ecoregion. Springer-Verlag, New York, 27 s. [online], cit. 2019-25-01, <http://www.nic.edu/library/superfund/refdocs%5Ccda0155.pdf>

KARR J.R., 2008. Protecting Society from Itself: Reconnecting Ecology and Economy. In: Soskolne C.L., Westra L., Kotzé L.J., Mackey B., Rees W.E. & Westra R. (eds.): Sustaining Life on earth. Lexington Books, ISBN 10-0-7391-1730-0,

s. 95 – 108.

KAY J.J., 1993. On the Nature of Ecological Integrity: Some Closing Comments. In: Woodley S., Kay J. & Francis G. (eds.): Ecological Integrity and the Management of Ecosystems. St. Lucie Press, Delray, Florida, USA, s. 210 – 212.

KAY J. J., 2000. Ecosystems As Self-Organizing Holarchic Open Systems: Narratives and the Second Law of Thermodynamics, In: Jorgenses S.E. &Müller F. (eds.): Handbook of Ecosystem Theories and anagement. CRC Press –Lewis Publishers, s. 135 – 160.

KAY J.J., 2001. Ecosystems, Science and Sustainability. In: Ulgiatti S., Brown M.T, Giampietro M., Herendeen R. & Mayumi K. (eds.): Proceedings of the 2nd international workshop: Advances in Energy studies: exploring supplies, constraints and strategies. Porto Venere, Italy, 23-27 May 2000, s. 319 – 328.

KAY J. J., 2002. On Complexity Theory, Exergy and Industrial ecology: Some implications for Industrial Ecology. In: Kibert C., Sendzimir J. & Guy B. (eds.): Construction Ecology: Nature ast the Basis for Green Buildings. Spon Press, s. 72 – 107.

KAY J.J., ALLEN T., FRASER R., LUVALL J.C. & ULANOWICZ R., 2001. Can we use energy based indicators to characterize and measure the status of ecosystems, human, disturbed and natural? In: Proceedings of the 2nd international workshop: Advances in Energy Studies: exploring supplies, constraints and strategies. Porto Venere, Italy, 23-27 May, s. 121 – 133.

KELLER J., 2005. Soumrak sociálního státu. Sociologické nakladatelství, Praha, ISBN 80-86429-41-5, 158 s.

KELLER J., 1997. Sociologie a ekologie. Sociologické nakladatelství, Praha, 232 s.

KELLER D.R., 2010. Environmentat Ethics: The Big Questions. Wiley-Blackwell, Chichester, ISBN 978-1-405-17638-5, 581 s.

KELLER J., 2011. Tři sociílní světy. Sociální struktura postindustriální společnosti. Sociologické nakladatelství, Praha, ISBN 978-80-7419-044-5, 211 s.

KERSCHNER CH., 2010: Economic de-growth vs. steady-state economy. *Journal of Cleaner Production* 18 (6): 544 – 551.

KIEDRZYŃSKI M., KIEDRZYŃSKA E., WITOSLAWSKI P., URBANIAK M. & KUROWSKI J.K., 2014. Historical Land Use, Actual Vegetation, and the Hemeroby Levels in Ecological Evaluation of an Urban River Valley in Perspective of Its Rehabilitation Plan. *Polish Journal of Environmental Studies* 23 (1): 109 – 117.

KIEHL J.T. & TRENBERTH K.E., 1997. Earth's Annual Global Mean Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78 (2): 197 – 208.

KIER G., MUTKE J., DINERSTEIN E., RICKETTS T.H., KÜPER W., KREFT H. & BARTHLOTT W., 2005. Global patterns of plant diversity and floristic knowledge. *Journal of Biogeography* 32 (7): 1107 – 1116.

KIM Y.M., ZERBE S. & KOWARIK I., 2002. Human impact on flora and habitats in Korean rural settlements. *Preslia* 74: 407 – 419.

KIRSCHNER M.W., 2005. The Meaning of Systems Biology. *Cell* 121 (4): 503 – 504.

KLEIDON A., 2009. Nonequilibrium thermodynamics and maximum entropy production in the Earth System. *Naturwissenschaften* 96: 653 – 667.

van KLEUNEN M., PYŠEK P., DAWSON W., ESSL F., KREFT H., PERGL J., WEIGELT P., STEIN A., DULLINGER S., KÖNIG CH., LENZNER B., MAUREL N., MOSER D., SEEBENS H., KARTESZ J., NISHINO M., ALEKSANYAN A., ANSONG M., ANTONOVA L.A., BARCELONA J.F., BRECKLE S.W., BRUNDU G., CABEZAS F.J., CÁRDENAS D., CÁRDENAS-TORO J., CASTAÑO N., CHACÓN E., CHATELAIN C., CONN B., DE SÁ DECHOUN M., DUFOUR-DROR J-M., EBEL A.L., FUGUEIREDO E., FRAGMAN-SAPIR O., FUENTES N., GROOM Q.J., HENDERSON L., INDERJIT, JOGAN N., KRESTOV P., KUPRIYANOV A., MASCIADRI S., MEERMAN J., MOROZOVA O., NICKRENT D., NOWAK A., PATZELT A., PELSER P.B., SHU W., THOMAS J., ULUDAH A., VELAYOS M., VERKHOSINA A., VILLASEÑOR J.L., WEBER E., WIERINGA J.J., YAZLIK A., ZEDDAM A., ZYKOVA E. & WINTER M., 2018: The Global Naturalized Alien Flora (GloNAF) database. *Ecology* 100 (1): e02542.

KLVAŇOVÁ A., VOŘÍŠEK P., GREGORY R.D., BURFI ELD I.J., ŠKORPILOVÁ J., AUNINŠ A., CHYLARECKI P., CROWE O., DE CARLI E., DEL MORAL J.C., ESCANDELL V., FOPPEN R.P.B., FORNASARI L, HELDBJERG H., HILTON G., HUSBY M., JAWINSKA D.,JIGUET F., JOYS A., KURESOO A., LINDSTRÖM A., MARTINS R., NOBLE D.G., REIF J., SCHMID H., SCHWARZ J., SZÉP T., TEUFELBAUER N., VÄISÄNEN R.A., VANSTEENWEGEN CH., WEISERBS A. & PECMS, 2009: The State of Europe's Common Birds 2008. CSO/RSPB, Prague, Czech Republic. [online]. cit. 2010-12-15, <http://www.sovon.nl/pdf/Common_2009_2_2.pdf>.

KOCH P.L. & BARNOSKY A.D., 2006. Late Quaternary Extinctions: State of the Debate. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics* 37(1): 215 – 250.

KOESTLER A., 1969. Some general properties of self-regulating open hierarchic order (SOHO). In: Koestler A. & Smythies J.R. (eds.): Beyond Reductionism: New Perspectives in the Life Sciences. Hutchinson, London, UK, s. 210 – 216. [online], cit. 2015-10-15, <https://www.panarchy.org/koestler/holon.1969.html>.

KOH L.P. & WILCOVE D.S., 2009. Oil palm: disinformation enables deforestation. *Trends in Ecology and Evolution* 24: 67 – 68.

KOHÁK E., 1993. Člověk, dobro a zlo. Ježek, Praha, ISBN 80-901625-3-3, 271 s.

KOHÁK E., 1998. Zelená svatozář. Sociologické Nakladalelství, Praha, ISBN 80-85850-63-X, 203 s.

KOMATSU K.J., AVOLIO M.L., LEMOINE N.P., ISBELL F., GRMAN E.,HOUSEMAN G.R., KORNER S.E., JOHNSON D.S., WILCOX K.R., ALATALO J.M., ANDERSON J.P., AERTS R., BAER S.G., BALDWIN A.H., BATES J., BEIERKUHNLEIN C., BELOTE R.T., BLAIR J., BLOOR J.M.G., BOHLEN P.J., BORK E.V., BOUGHTON E.H., BOWMAN W.D., BRITTON A.J., CAHIL J.F., CHANETON E., CHIARIELLO N.R., CHENG J., COLLINS S.L., CORNELISSEN J.H.C., DU G., ESKELINEN A., FIRN J., FOSTER B., GOUG L., GROSS K., HALLETT L.M., HAN X., HARMENS H., HOVENDEN M.J., JAGERBRAND A., JENTSCH A., KERN CH., KLANDERUD K., KNAPP A.K., KREYLING J., LI W., LUO Y., MCCULLEY R.L., MCLAREN J.R., MEGONIGAL J.P., MORGAN J.W., ONIPCHENKO V., PENNINGS S.C., PREVÉY J.S., PRICE J.N., REICH P.B., ROBINSON C.H., RUSSELL F.L., SALA O.E., SEABLOOM E.W., SMITH M.D., SOUDZILOVSKAIA N.A., SOUZA L., SUDING K., SUTTLE K.B., SVEJCAR T., TILMAN D., TOGNETTI P., TURKINGTON R., WHITE S., XU Z., YAHDJIAN L., YU Q., ZHANG P. & ZHANG Y., 2019. Global change effects on plant communities are magnified by time and the number of global change factors imposed. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116 (36): 17867 – 17873.

KOVÁČ L., 2003. Ľudské vedomie je produktom evolučnej eskalácie emocionálneho výberu. In: Kelemen J. (ed.): Kognice a umělý život. III. Slezská univerzita, Opava, s. 75 – 93.

KOVÁČ K. & LACKO-BARTOŠOVÁ M., 2004. Formy poľnohospodárskeho využívania krajiny: minulost, súčasnosť a budúcnosť. *Životné protredie* 38 (3): 77 – 80.

KOVÁČ K. & MACÁK M., 2007. Ekologické pestovanie rastlín. Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, Nitra, ISBN 978-80-8069-921-5, 160 s.

KOVÁŘ P. 2014. Ekosystémová a krajinná ekologie. Karolinum, Praha, ISBN 978-80-246-2788-5, 170 s.

KOZOVÁ M., PAUDITŠOVÁ E. & FINKA M. (eds.), 2010. Krajinné plánovanie. Nakladateľstvo STU v Bratislave, Bratislava, ISBN978-80-227-3354-0, 301 s.

KOZOVÁ M., HRNČIAROVÁ T., FINKA M., HREŠKO J., HUBA M., IZAKOVIČOVÁ Z., JAMEČNÝ Ľ., KANKA R., MIDRIAK R., MIŠÍKOVÁ P., PETLUŠ P., OSZLÁNYI J., OŤAHEL J., PICHLEROVÁ M., RUŽIČKA M., SUPUKA J., ŠPULEROVÁ J., ŠTĚPÁNKOVÁ R. & ZAUŠKOVÁ Ľ., 2011. History and Current State of Landscape Ecology in Slovakia : contribution of the Slovak landscape Ecologists to the 8th IALE World Congress 2011. August 18-22, 2011, Beijing, China. Slovenská asociácia pre krajinnú ekológiu (IALE-SK), Bratislava, ISBN 978-80-969801-1-6, 36 s.

KRAUSMANN F., ERB K.-H., GINGRICH S., HABERL H., BONDEAU A., GAUBE V., LAUK CH., PLUTZAR H. & SEARCHINGER T.D., 2013. Global human appropriation of net primary production doubled in the 20th century. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110 (25): 10324 – 10329 .

KREBS C. J., 1972. Ecology: the experimental analysis od distribution and abundance. Harper and Row Publishers, New York, 694 s.

KREBS C.J., BOONSTRA R., BOUTIN S. & SINCLAIR A.R.E., 2001. What Drives the 10-year Cycle of Snowshoe Hares? *BioScience* 51 (1): 25 – 35.

KREMPASKÝ J., 1982. Fyzika. Učebnica pre vysoké školy technické. Alfa Bratislava, SNTL Praha, 760 s.

KREMPASKÝ J., 1986. Vesmírne metamorfózy, Svet očami fyziky. Vydavateľstvo Smena, Bratislava, ISBN 073-022-89, 285 s.

KRCHNÁK P., 1999. Humanizácia ekologizáciou alebo budúcnosť ľudskosti ako kľúč k budúcnosti. Vedecké štúdie, Technická univerzita vo Zvolene, Zvolen, ISBN 80-228-0905-5, 61 s.

KRIŽOVÁ E., UJHÁZY K. & NIČ J., 2010. Fytocenológia a lesnícka typológia. Technická univerzita vo Zvolene, Zvolen, s. 191, [online], cit. 2019-12-15, <https://kf.tuzvo.sk/sites/default/files/krizova-2010-skripta.pdf>.

KUHN T.S., 1962. The Structure of Scientific Revolutions, 3rd Ed. Univertsity of Chicago Press, Chicago and London,, 1996, ISBN 0-226-45808-3, 226 s.

KŰPPERS B-O., 1990. Information and the Origin of Life. The MIT Press, Massachusetts, ISBN 9780262111423, 237 s.

KURAS T., 2013. Ekologie společenstev a ekosystémů. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Olomouc, ISBN 978-80-244-3501-5, 139 s.

LACIS A.A., 2012. Greenhouse Effect. In: Liu G. (ed.), Greenhouse Gases: Emission, Measurement and Management. InTech, s. 275 – 294.

LACKO-BARTOŠOVÁ M., CAGÁŇ Ľ., ČUBOŇ J., KOVÁČ, K., KOVÁČIK P., MACÁK M., MOUDRÝ J. & SABO, P., 2005. Udržateľné a ekologické poľnohospodárstvo. Slovenská poľnohospodárska univerzita, Nitra, ISBN 80-8069-556-3, 575 s.

LAI CH-H. & LIN S.H., 2017. Systems theory. In: Scott C.R., Lewis L., Barker J.R., Keyton J., Kuhn T. & Turner P.K. (eds.): The International Encyclopedia of Organizational Communication. Vol. 4, Organizational Communitation R – Z. John Wiley & Sons, Chichester, UK, s. 2354 – 2372.

LAPIN M., FAŠKO P., MELO M., ŠŤASTNÝ P. & TOMLAIN J., 2002. Klimatické oblasti. In: Atlas krajiny Slovenskej republiky. Bratislava MŽP SR, SAŽP Banská Bystrica, s. 106.

LEHOTSKÝ M., NOVOTNÝ J. & GREŠKOVÁ A., 2008. Complexity and landscape. *Geografický časopis* 60: 95 – 112.

LEO D.G. & LEVIN S., 1997. The Multifaceted Aspects of Ecosystem Integrity. *Conservation Ecology* 1 (1): 3.

LEOPOLD A., 1999. Obrázky z chatrče a rozmanité poznámky. Abies – Vydavateľstvo Lesoochranárskeho zoskupenia Vlk, Tulčík, ISBN 80-88699-13-4, 269 s.

LEPEŠKA T., 2009. Integrovaný manažment povodí – minulosť, súčasnosť a vízie do budúcnosti. *Acta Facultatis Ecologiae*, 20: 83 – 91.

LEPEŠKA T., 2019. Ekohydrológia. Skriptá Fakulty ekológie a environmentalistiky. Technická univerzita vo Zvolene, Zvolen, ISBN 798-80-228-3193-2, 136 s.

LEPŠ J., 2013. Diversity and ecosystem function. In: van der Maarel E. & Franklin, J. (eds.): Vegetation ecology. Wiley, Oxford. s. 308 – 346.

LESY SR, 2020. Forest Stewardship Council – FSC. Lesy Slovenskej republiky, š. p., [online], cit. 2020-03-15, <https://www.lesy.sk/lesy/o-lese/certifikacia-lesov/forest-stewardship-council-fsc.html>.

LEVIN S.A., 1998. Ecosystems and the Biosphere as Complex Adaptive Systems. *Ecosystem,*1: 431 – 436.

LEVIN S.A., 2005. Self-organization and the Emergence of Complexity in Ecological Systems. *BioScience* 55(12): 1075 – 1079.

LÉVÉQUE CH. & MOUNOLOU J.C., 2003. Biodiversity. John Wiley & Sons, Chichester, UK, ISBN 0-470-84-957-6, 298 s.

LEWIS S.L, BRANDO P.M., PHILLIPS O.L., VAN DER HEIJDEN G.M.F. & NEPSTAD D., 2011. The 2010 Amazon Drought. *Science* 331 (6017): 554.

LIESKOVSKÁ Z. & NÉMETHOVÁ M. (eds.), 2017. Správa o stave životného prostredia Slovenskej republiky v roku 2016. Ministerstvo životného prostredia SR, Bratislava, Slovenská agentúra životného prostredia, Banská Bystrica, ISBN 978-80-89503-94-0, 218 s.

LIESKOVSKÁ Z. & LÉNYIOVÁ P. (eds.), 2019. Správa o stave životného prostredia Slovenskej republiky v roku 2018. Ministerstvo životného prostredia SR, Slovenská agentúra životného prostredia, ISBN 978-80-8213-007-5, 222 s.

LIM Y-K., CAI M., KALNAY E. & ZHOU L., 2008. Impact of Vegetation Types on Surface Temperature Change. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47: 411 – 424.

LIN B.L., SAKODA A., SHIBASAKI R. & SUZUKI M., 2001. A Modelling Approach to Global Nitrate Leaching Caused by Anthropogenic Fertilisation. *Water Research* 35(8): 1961 – 1968.

LIN H. ,CAO M., STOY P.C. & ZHANG Y., 2009. Assessing self-organization of plant communities – a thermodynamic approach. *Ecological Modelling* 220 (6): 784 – 790.

LIN H., CAO M. & ZHANG Y., 2010. Self-organization of tropical seasonal rain forest in southwest China. E*cological Modelling* 222: 2812 – 2816.

LIN H., CHEN Y., SONG Q., FU P., CLEVERLY J., MAGLIULO V., LAW B.E., GOUGH CH.M., HÖRTNAGL L., DI GENNARO F., MATTEUCCI G., MONTAGNANI L., DUCE P., SHAO CH., KATO T., BONAL D., PAUL-LIMOGES E., BERINGER J., GRACE J. &FAN Z., 2017. Quantifying deforestation and forest degradation with thermal response. *Science of the Total Environment* 607–608 (31): 1286 – 1292.

LINDENMAYER D., THORN S. & BANKS S., 2017. Please do not disturb ecosystems further. *Nature, Ecology* & *Evolution* 1 (3): 0031.

LISICKÝ M.J., 1996. Ekosozológia pre študentov environmentálnej výchovy. Fakulta prírodných vied, Univerzita Mateja Bela v Banskej Bystrici, Banská Bystrica, 99 s.

LIŠČÁK P., JELÍNEK R., OLŠAVSKÝ M., ŽILKA A. & MELICHERČÍK J., 2014. Hlinito-kamenité prúdy vo Vrátnej. Informatívna správa z geologického prieskumu. [online], cit. 2015-10-12, <http://www.geology.sk/new/sites/default-/files/media/Aktuality/Vratna_dolina_2014/Vratna_informat%C3%ADvna_sprava_web.pdf>.

LIU Z.Y., WANG Y., GALLIMORE R., NOTARO M. & PRENTICE I.C., 2006. Prentice (2006), On the cause of abrupt vegetation collapse in North Africa during the Holocene: Climate variability vs. Vegetation feedback. *Geophysical Research Letters* 33: L22709.

LOTKA A.J., 1925. Elements of physical biology. Wiliams and Wilkins Company, Baltimore, 495 s.

LOVELOCK J., 1991. GAIA, The Practical Science of Planetary Medicine. Gaia Books, Somerset, UK, ISBN 1-85675-040-X, 192 s.

LOVELOCK J., 1993. Gaia, nový pohled na život na Zemi (slovenský preklad). Abies – Vydavateľstvo Lesoochranárskeho zoskupenia Vlk, Tulčík, ISBN 80-88699-03-7, 175 s.

LOVELOCK J., 2006. The Revenge of Gaia: Earth's Climate Crisis and The Fate of Humanity. Basic Books, New York, ISBN 978-0-465-04168-8, 177 s.

LOVINS A., LOVINS L.H. & HAWKEN P., 2006. A Road Map for Natural Capitalism. *Harvard Business Review* 77 (3): 145 – 158.

LUVALL J.C. & HOLBO H.R., 1989. Measurement of short-term thermal responses of coniferous forest canopies using thermal scanner data. *Remote Sensing of Environment* 27 (1): 1 – 10.

van der MAAREL E., 2007. Transformation of cover-abundance values for appropriate numerical treatment – Alternatives to the proposals by Podani. *Journal of Vegetation Sciense* 18 (5): 767 – 770.

MADDOX T., PRIATNA D., GEMITA E. & SALAMPESSY A., 2007. The conservation of tigers and other wildlife in oil palm plantations. Jambi Province, Sumatra, Indonesia. ZSL Conservation Report No. 7. The Zoological Society of London (ZSL), London, 65 s. [online], cit. 2020-06-10, <https://conservewildcats.org/wp-content/uploads/sites/5/WildCats/ProjectReports/Indonesia/ZSL_The-conservation-of-tigers-and-other-wildlife-in-oil-palm-plantations-zsl-no-7-b-409.pdf>.

MAES W.H., PASUYSEN T., TRABUCCO A., VEROUSTRAETE F. & MUYS B., 2011. Does energy dissipation increase with ecosystem succession? Testing the ecosystem theory combining theoretical simulations and thermal remote sensing observations. *Ecological Modelling* 222 (23–24): 3917 – 3941.

MAES J., EGOH B., WILLEMEN L., LIQUETE C., VIHERVAARA P., SCHÄGNER J.P., GRIZZETTI B., DRAKOU E.G., LANOTTE A., ZULIAN G., BOURAOUI F., PARACCHINI M.L., BRAAT L. & BIDOGLIO G., 2012. Mapping ecosystem services for policy support and decision making in the European Union. *Ecosystem Services* 1: 31 – 39.

MAGLOCKÝ Š., 1979. Xerotermná vegetácia v Považskom Inovci. *Biologické práce* 25 (3): 129 s.

MAHOWALD N., 2013. Atmospheric Biogeochemistry. In: Leemans R. (ed.): Ecological Systems. Selected Entries from the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology. Springer Science+Business Media, New York, s. 7 – 30.

MAHOWALD N., ALBANI S., KOK J., ENGELSTAEDTER S., SCANZA R., WARD D.S. & FLANNER M., 2014. The size distribution of desert dust aerosols and its impact on the Earth system. *Aeolian Research* 15: 53 – 71.

MACHAR I., 2012. Changes in ecological stability and biodiversity in a floodplain landscape. In:

MACHAR I. (ed.): Applying landscape ecology in conservation and management of the floodplain forests (Czech Republic). Univerzita Palackého, Olomouc,s. 73 – 78.

MACHAR I., VOŽENÍLEK V., KIRCHNER K., VLČKOVÁ V. & BUČEK A., 2017. Biogeografický model změn klimatických podmínek vegetační stupňovitosti v Česku. *Geografie* 122/1, 11s.

MACHAR I., VLCKOVA V., SALEK L., PECHANEC V., NOWAK A., NOWAK S., PLASEK V., ŠVAJDA J., OPRSAL Z. & TOPACOGLU O., 2018. Environmental Modelling of Forest Vegetation Zones as a Support Tool for Sustainable Management of Central European Spruces Forests. *Journal of Landscape Ecology* 11 (3): 45 – 63.

MACHAR I., POPRACH K., HARMACEK J. & FIALOVA J., 2019a. Bird Diversity as a Support Decision Tool forSustainable Management in Temperate Forested Floodplain Landscape. *Sustainability* 11 (6): 1527.

MACHAR I., SCHLOSSAREK M., PECHANEC V., URADNICEK L., PRAUS L. &SIVACIOĞLU A., 2019b. Retention Forestry Supports Bird Diversity in Managed, Temperate Hardwood Floodplain Forests. *Forests* 10 (4): 300: 11 s.

MAKARIEVA A. & GORSHKOV V., 2007. Biotic pump of atmospheric moisture as driver of hydrological cycle on land. *Hydrology and Earth System Sciences* 11 (2): 1013 – 1033.

MAKARIEVA A. & GORSHKOV V., 2010. The Biotic Pump: Condensation, atmosheric dynamics and climate. *International Journal of Water* 5 (4): 365 – 385.

DeMALACH N., ZAADY E., WEINER J. & KADMON R., 2016. Size asymmetry of resource competition and the structure of plant communities. *Journal of Ecology* 104 (4): 899 – 910.

MALHI Y., ARAGAO L.E.O.C., GALBRAITH D., HUNTINGFORD CH., FISHER R., ZELAZOWSKI P., SITCH S., MCSWEENEY C. & MEIR P., 2009. Exploring the likelihood and mechanism of a climate-chage-induced dieback of the Amazon rainforest. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106 (49): 20610 – 20615.

MALTBY L., 2018. The Pesticide Paradox : Creating a safe killer. In: Research Impact Stories. The University of Sheffield, Sheffield, UK. [online], cit. 2020-05-10, <http://researchstories.group.shef.ac.uk/impact/the-pesticide-paradox/>.

MANDELBROT B.B., 1982. The Fractal Geometry of Nature. W. H. Freeman and Company, New York, ISBN 978-0716711865, 468 s.

MARGULIS L., 2005. Symbiotická planéta. Kalligram, Bratislava, ISBN 80-7149-790-8, 164 s.

MARTINKOVIČOVÁ M., 1999. Ekofilozofia. Ekonomická fakulta, Univerzita Mateja Bela v Banskej Bystrici, Banská Bystrica, ISBN 80-8055-306-8, 141 s.

MEA, 2005. Ekosystémy a lidský blahobyt: Syntéza. Millennium Ecosystem Assesment, World Resource Institute – Centrum pro otázky životního prostředí. Univerzita Karlova v Praze, Praha, ISBN 80-239-6300-7, 138 s.

McNEELY J., 1992. Nature and culture. Conservation needs them both. *Nature and Resources* 28 (3): 37 – 43.

MEA, 2005. Ekosystémy a lidský blahobyt: Syntéza. Millenium Ecosystem Assesment, World Resource Institute, české vyd. Centrum pro otázky životního prostředí. Univerzita Karlova v Praze, Praha, ISBN 80-239-6300-7, 138 s.

MEADOWS D.H., RANDERS J. & MEADOWS D.L., 2004. Limits to Growth. The 30-Year Update. 3rd ed. Chelsea Green Publishing, White River Junction, ISBN-10: 1-931498-58 X, 338 s.

MEDERLY P. (ed.), 2001. Trvalo udržateľný rozvoj – výzva pre Slovensko, Regionálne environmentálne centrum pre krajiny strednej a východnej Európy, REC Slovensko, Bratislava, ISBN 80-968591-7-X, 127 s.

MEDERLY P. & HUDEKOVÁ Z., 2005. Udržateľný rozvoj miest v Slovenskej republike : návrh súboru indikátorov a ich využitie pri vyhodnotení udržateľného rozvoja miest. Regionálne environmentálne centrum pre krajiny strednej a východnej Európy, REC Slovensko, Bratislava, ISBN 80-969436-1-8, 149 s.

MEDERLY P., ČERNECKÝ J., ŠPULEROVÁ J., IZAKOVIČOVÁ Z., JANČOVIČ M., ĎURICOVÁ V., STAŠOVÁ S., HREŠKO J., PETROVIČ F., ŠTEFUNKOVÁ D., ŠATALOVÁ B., MOČKO M., VRBIČANOVÁ G., KAISOVÁ D., TURANOVIČOVÁ M., KOVÁČ T. & LACO I., 2019. Katalóg ekosystémovýchslužieb Slovenska. ŠOP SR Banská Bystrica, UKF v Nitre, ÚKE SAV Nitra, ISBN 978-80-8184-067-8, 215 s., [online], cit. 2020-03-10, <http://www.sopsr.sk/natura/dokumenty/Katalog-ES.pdf>.

MEDVECKÁ J., KLIMENT J., MÁJEKOVÁ J., HALADA Ľ., ZALIBEROVÁ M., GOJDIČOVÁ E., FERÁKOVÁ V. & JAROLÍMEK I., 2012. Inventory of the alien flora of Slovakia. *Preslia* 84: 257 – 309.

MEDVEDEV S.S., 2012. Mechanisms and physiological role of polarity in plants. *Russian Journal of Plant Physiology* 59 (4): 502 – 514.

MICKLIN P., 2007. The Aral Sea disater. *Earth and Planetary Sciences* 35: 47 – 72.

MIČIAN Ľ., 1999. Geografia, fyzický geografia, krajinná ekológia, geoekológia: ich interpretácie a funkcie. *Geografický časopis* 51 (4): 331 – 345.

MIČIAN Ľ., 2008. Všeobecná geoekológia. Geo-grafika, Univerzita Komenského, Bratislava, ISBN 978-80-89317-04-2, 87 s.

MIDRIAK R., 1983. Morfogenéza povrchu vysokých pohorí. Veda, Bratislava, 516 s.

MIDRIAK R., 1993. Únosnosť a racionálne využívanie vysokých pohorí Slovenska. ÚV SZOPK, Bratislava, ISBN 80-85453-14-2, 114 s.

MIDRIAK R. (ed.), 2004. Horská a vysokohorská krajina: zborník referátov z vedeckej konferencie k 65. výročiu narodenia prof. Ing. Rudolfa Midriaka, DrSc., konanej 1. júla 2004 v Banskej Štiavnici. Technická univerzita vo Zvolene, Zvolen, ISBN 80-228-1397-4, 253 s.

MIDRIAK R., ZAUŠKOVÁ Ľ., SABO P., GALLAY I., GALLAYOVÁ Z., LEPEŠKA T., HLADKÁ D., LIPTÁK J., ŠÁLY R., KRAJČOVIČ V., ELIÁŠ P., ŠEBEŇ V., ŠMELKO Š., TURISOVÁ I., UHLIAROVÁ E., ŠVIDROŇ I. & COCHOVÁ S., 2011. Spustnuté pôdy a pustnutie krajiny Slovenska. Inštitút výskumu krajiny a regiónov, Centrum vedy a výskumu, Fakulta prírodných vied, Univerzita Mateja Bela v Banskej Bystrici, Banská Bystrica, ISBN 978-80-557-0110-3, 401 s.

MICHALKO J., BERTA J. & MAGIC D., 1986. Geobotanická mapa ČSSR. Veda, Vydavateľstvo SAV, Bratislava, 163 s.

MÍCHAL I., 1994. Ekologická stabilita. Veronica, Brno, ISBN 80-85368-22-6, 275 s.

MICHENER W.K., BAERWALD T.J., FIRTH P., PALMER M.A., ROSENBERGER J.L., SANDLIN E.A. & ZIMMERMAN H., 2001. Defining and Unraveling Biocomplexity. *BioScience* 51 (12): 1018 – 1023.

MIKLÓS L., 1992. Conception of territorial system of ecological stability in Slovakia. In: Proceedings of the Field Workshop Ecological Stability of Landscape Ecological Infrastructure Ecological Management, Federal Committee for the Environment, Institute of Applied Ecology Kostelec nad Černými lesy, s. 41 – 59.

MIKLÓS L.,1998. Landscape as a Geosystem.,*Ekológia* 17 (Suppl. 1): 52 – 74.

MIKLÓS L. & IZAKOVIČOVÁ Z., 1997. Krajina ako geosystém. Veda, Bratislava, ISBN 80-224-0519-1, 152 s.

MIKLÓS L., KOČICKÁ E., KOČICKÝ D. & DIVIAKOVÁ A., 2015. Geosystémy ako krajinnoekologická základňa pre integrovaný manažment krajiny. Technická univerzita vo Zvolene, Zvolen, ISBN 978-80-228-2716-4, 101 s.

MIKLÓS L. & DIVIAKOVÁ A. (eds.), 2017. Ciele trvalo udržateľného rozvoja: méta integrovaného manažmentu životného prostredia. In: Zborník pôvodných vedeckých prác, Technická univerzita vo Zvolene, Zvolen, ISBN 978-80-228-3029-4, 224 s.

MIKULECKY D.C., 1995. Life, Complexity and the Edge of Chaos: Cognitive Aspects of Communication Between Cells and Other Coponents of Living systems. Department of Physiology Medical College of Virginia Commonwealth University, Richmond, USA, [online], cit. 2020-04-20, <http:// views.vcu.edu/(mikuleck/rev.htm>.

MILLER G.T., 2005. Living in the Environment. Principles, Connections, and Solutions. 14th ed. Thomson Learning, London, UK, ISBN 0-534-99729-5, 642 s.

MILLER G.T. JR. & SPOOLMAN S.E., 2011. Living in the Environment. Principles, Connections, and Solutions. 17th ed. Brooks/Cole, Belmont, CA, ISBN 978-0-538-73534-6, 800 s.

MIŽÍK P., 2008. *Solidago canadensis* L. – zlatobýl kanadský / zlatobyľ kanadská. [online], cit. 2019-10-10, <https:// botany.cz/cs/solidago-canadensis/>.

MOUBAYIDIN L. & ØSTERGAARD L., 2014. Dynamic Control of Auxin Distribution Imposes a Bilateral-to-Radial Symmetry Switch during Gynoecium Development. *Current Biology* 24 (22): 2743 – 2748.

MP SR, 2020. Program rozvoja vidieka SR na programové obdobie 2014 – 2020. [online], cit. 2019-09-09, <https:// www.mpsr.sk/?navID=47&sID=43&navID2=1230>.

MURRAY J. & KING D., 2012. Oil´s tipping point has passed. *Nature* 481: 433 – 435.

MUYS B., 2013. Sustainable development within Planetary Boundaries: A Functional Revision of the Definition Based on the Thermodynamics of Complex Social-Ecological Systems. *Challenges in Sustainability* 1 (1): 41 – 52.

MÜLLER F., 2005. Indicating ecosystem and landscape organisation. *Ecological Indicators* 5 (4): 280 – 294.

MŽP SR, 1996. Agenda 21 a ukazovatele trvalo udržateľného rozvoja. Ministerstvo žiotného prostredia Slovenskej republiky, Bratislava, ISBN 80-88833-03-5, 517 s.

MŽP SR, 2013: Aktualizovaná národná stratégia ochrany biodiverzity do roku 2020. Ministerstvo životného prostredia SR, Bratislava, 40 s., [online], cit. 2019-09-09, < https://www.minzp.sk/files/sekcia-ochranyprirodyakrajiny/dohovory/biodiverzita/narodna_strateg_ochr_biodiverz_2020.pdf>.

MŽP SR, 2018. Stratégia adaptácie Slovenskej republiky na zmenu klímy. Ministerstvo životného prostredia SR, Bratislava, 145 s., [online], cit. 2019-09-09, <https://www.minzp.sk/files/odbor-politiky-zmeny-klimy/strategia-adaptacie-sr-zmenu-klimy-aktualizacia.pdf>.

NAESS A., 1996. Ekologie, Pospolitost a životní styl (český preklad). Abies – Vydavateľstvo Lesoochranárskeho zoskupenia Vlk, Tulčík, ISBN 80-88699-09-6, 310 s.

NARUSE M. & IBA T., 2008. Ecosystems as an autopoietic systems. Considering Relationship between Ecology and Society based on Luhman´s Theory. Fourth Joint Japan – North American Mathematical Sociology Conference, May 2008. [online]. cit. 2018-06-20, <http://web.sfc.keio.ac.jp/~iba/papers/2008JJNAMS08-ecosystem.pdf>.

NASI R., TABER A. & VAN VLIET N., 2011. Empty forests, empty stomachs? Bushmeat and livelihoods in the Congo and Amazon Basins. *International Forestry Review* 13 (3): 355 – 368.

MANUEL-NAVARRETE D., KAY J.J. & DOLDERMAN D., 2004. Ecological Integrity Discourses: Linking Ecologcy with Cultural Transformation. *Human Ecology Review* 11 (3): 215 – 229.

NAVARRO L.M. & PEREIRA H.M., 2012. Rewilding Abandoned Landscapes in Europe. *Ecosystems* 15: 900 – 912.

NAVEH Z., 1987. Biocybernetic and thermodynamic perspective of landscape functions and land use patterns. *Landscape Ecology* 1 (2): 75 – 83.

NEF, 2006. The Happy Planet Index. New Economics Foundation, [online], cit. 2020-02-10, <https://neweconomics.org/uploads/files/54928c89090c07a78f_ywm6y59da.pdf>.

NELSON G.C., BENNETT E., BERHE A.A., CASSMAN K., DEFRIES R., DIETZ T., DOBERMANN A., DOBSON A., JANETOS A., LEVY M., MARCO D., NAKICENOVIC N., O'NEILL B., NORGAARD R., PETSCHELL-HELD G., OJIMA D., PINGALI P., WATSON R. & ZUREK M., 2006. Anthropogenic Drivers of Ecosystem change: an Overview. *Ecology and Society* 11 (2): 29.

NEWBOLD T., HUDSON L.N), ARNELL A.P., CONTU S., DE PALMA A., FERRIER S., HILL S.L.L., HOSKINS A.J., LYSENKO I., PHILLIPS H.R.P., BURTON V.J., CHNG CH.W.T., EMERSON S., GAO D., PASK-HALE G., HUTTON J., JUNG M., SANCHEZ-ORTIZ K., SIMMONS B.I., WHITMEE S., ZHANG H., SCHARLEMANN J.P.W. & PURVIS A., 2015. Has land use pushed terrestrial biodiversity beyond the planetary boundary? A global assessment. *Science* 353 (6296): 288 – 291.

NOBEL PRIZE, 2013. The Nobel prize in Physics 2013. [online], cit. 2019-09-20, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2013/summary/>.

NOBRE C.A. & BORMA L.S., 2009. Tipping points´for the Amazon forest. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 1 (1): 28 – 36.

NOVÁČEK P. & HUBA M., 1994. Ohrožená planeta. Vydavatelství Univerzity Palackého, Olomouc, ISBN 80-7067-38, 203 s.

NOVÁČEK P., 2010. Udržitelný rozvoj. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, ISBN 978-80-244-2514-6, 430 s.

NOVÁČEK P., 2011. Dlhodobě udržitelný rozvoj, udržitelný ústup, nebo rozvrat? In: Huba M., Ira V& Šuška P. (eds.): Cesty k udržateľnej budúcnosti. Geografický ústav SAV, Bratislava, s. 35 – 43.

O´CONNOR M.I., PENNELL M.W., ALTERMATT F., METTHEWS B., MELIÁN C.J. & GONZALES A., 2019. Principles of Ecology Revisited: Integrating Information and Ecological Theories for a More Unified Science. *Frontiers in Ecology and Evolution* 7: 219.

ODUM E.P., 1953. Fundamentals of Ecology. W. B. Saunders, Philadelphia, London, xii + 384 s.

ODUM E.P., 1964. The new ecology. *Bioscience* 14: 14 – 16.

ODUM E.P., 1977. Základy ekologie. Academia, Praha, 733 s.

ODUM E.P., 1977b. The emergence of ecology as a new integrative discipline. *Sciencie* 195: 1289 – 1293.

OESTREICHER CH., 2007. A history of chaos theory. *Dialogues in Clinical Neuroscience* 9 (3): 279 – 289.

OKÁNIKOVÁ Z., GUZIOVÁ Z., URBAN P., FABRICIUSOVÁ V., HORNÍK S., ŠUFLIARSKY J., MALATINEC M., KRÁĽ P., KOFIRA M., BARIAK J. & MALČEK Ľ., 2014: Akčný plán biosférickej rezervácie Poľana. Správa CHKO BR Poľana, Zvolen, 50 s. (mscr.) [Depon. in Správa CHKO Poľana, Zvolen].

OLIVER T.H., HEARD M.S., ISAAC N.J.B., ROY D.B., PROCTER D., EIGENBROD F., FRECKLETON R., HECTOR A., ORME C.D.L., PETCHEY O.L., PROENÇA V., RAFFAELLI D., SUTTLE K.B., MACE G.M., MARTÍN-LÓPEZ B., WOODCOCK B.A. & BULLOCK J.M., 2015. Biodiversity and Resilience of Ecosystem Functions. *Trends in Ecology & Evolution* 30 (11): 673 – 684.

OLSON D.M., DINERSTEIN E., WIKRAMANAYAKE E.D., BURGESS N.D., POWELL G.V.N., UNDERWOOD E.C., D´AMICO J.A., ITOUA I., STRAND H.E., MORRISON J.C., LOUCKS C.J., ALLNUTT T.F., RICKETTS T.H., KURA Y., LAMOREUX J.F., WETTENGEL W.W., HEDAO P. & KASSEM K.R., 2001. Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Lief on Earth. *Bioscience* 51 (11): 933 – 938.

OPAVA Z., 1986. Chemie kolem nás. Albatros, Praha, 318 s.

ORGANIC WITHOUT BOUNDARIES, 2020. Global data Reveals Another Record Year for Organic Agriculture. [online]. cit. 2019-11-20, <https://www.organicwithoutboundaries.bio/2019/02/28/organic-agriculture-statistics-book-2019/>.

OSTBERG S., BOYSEN L.R., SCHAPHOFF S., LUCHT W. & GERTEN D., 2018. The Biosphere Under Potential Paris Outcomes. *Earth´s Future* 6: 23 – 39.

OSTROM E., 2009. A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. *Science* 325 (419): 419 – 422.

OSZLÁNYI J., 2000. Forestry-managerial measurements in the context of landscape-ecological planning in the Danube river inundation. *Ekológia* 19: 112 – 117.

PALMER C., McSHANE K. & SANDLER R., 2014. Environmental Ethics. *Annual Review of Environment and Resources*

39: 419 – 442.

PARROT L., 2002. Complexity and the Limits of Ecological Engineering. American Society of Agriculture Engineers, *Transactions of the ASAE* 45 (5): 1697 – 1702.

PARROT L., 2010. Measuring ecological complexity. *Ecological indicators* 10 (6): 1069 – 1076.

PARTELOW S., 2018. A review of the social-ecological systems framework: applications, methods, modifications and challenges. *Ecology and Society* 23 (4): 36., [

PATRÍCIO J., ULANOWICZ R., PARDAL M. A. & MARQUES J. C., 2006. Ascendency as ecological indicator for environmental quality assessment at the ecosystem level: a case study. *Hydrobiologia* 555 (1): 19 – 30.

PAULOV J., 2002. Komplexita a geografia. *Geografický časopis* 54 (4): 393 – 398.

PAVLÍK J. & PAVLÍK Š., 2001. Ochrana prírody v mestách – sociálny, estetický a hygienický konflikt. *Životné prostredie* 35 (4): 191 – 194.

PEARCE D. & MORAN D., 1994. The Economic Value of Biodiversity. IUCN, The World Conservation Union, Earthscan Publications, London, 104 s.

PEREIRA N., 2008. Phenomenon of „green Sahara". *Current Science* 95: 1114.

PERETS H.B., GAL-YAM A., MAZZALI P.A., ARNETT D., KAGAN D., FILIPPENKO A.V., LI W., ARCAVI I., CENKO S.B., FOX D.B., LEONARD D.C., MOON D.S., SAND D.J., SODERBERG A.M., ANDERSON J.P., JAMES P.A., FOLEY R.J., GANESHALINGAM M., OFEK E.O., BILDSTEN L., NELEMANS G., SHEN K.J., WEINBERG N.N., METZGER B.D., PIRO A.L., QUATAERT E., KIEWE M. & POZNANSKI D., 2010. A faint type of supernova from a white dwarf with a helium-rich companion. *Nature* 465 (7296): 322 – 325.

PETROVIČ F., IZAKOVIČOVÁ Z., MEDERLY P. & MOYZESOVÁ M., 2007. Environmentálne hľadiská trvalo udržateľného rozvoja Zeme. Univerzita Konštantína Filozofa v Nitre, Fakulta prírodných vied, ISBN 978-80-8094-200-7, 110 s.

PETROZZI F., AMORI G., FRANCO D., GAUBERT P., PACINI N., ENIANG E.A., AKANI G.C.,POLITANO E. & LUISELLI L., 2016. Ecology of the bushmeat trade in West and Central Africa. *Tropical Ecology* 57 (3): 547 – 559.

PICKETT S.T.A. & WHITE P.S. (eds.), 1985. The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics. Academic Press, Orlando, ISBN 978-0-12-554520-4, 472 s.

PIDWIRNY M., 2012. Solar radiation. The Encyclopedia of the Earth. [online]. cit. 2019-11-20, <http://www.eoearth.org/view/article/156098/>.

PIMENTEL D.A.V., AYMAR I.M. & LAWSON M., 2018. Reward Work, not Wealth - To end the inequality crisis, we must build an economy for ordinary working people, not the rich and powerful. Oxfam GB for Oxfam International, Oxford, UK, ISBN 978-1-78748-135-0, 76 s.

PIMENTEL D.A.V., WESTRA L. & NOSS R.F. (eds.), 2000. Ecological Integrity: Integrating Environment, Conservation, and Health. Island Press, Washington DC, 448 s.

PINGALI P.L., 2012. Green Revolution: Impacts, limits, and the path ahead. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109 (31): 12302 – 12308.

PLESNÍK J., 2009. Biologická rozmanitost a změna podnebí. *Ochrana přírody* 2009 – Zvláštní číslo. [online], cit. 2020-06-10, <https://www.casopis.ochranaprirody.cz/zvlastni-cislo/biologicka-rozmanitost-a-zmena-podnebi/>.

PLESNÍK J., 2010. Příroda jako proudící mozaika. Co přinesly novější poznatky ekosystémové ekologie. *Ochrana přírody* 65/3: 27 – 30.

PLESNÍK J. & VAČKÁŘ D., 2005. Biodiverzita a fungování ekosystémů. Jak hlouběji pochopit, co se v ekosystému děje? *Vesmír* 84: 32 – 37.

PLESNÍK J., 2018. Ekosystém v teorii a praxi ochrany přírody. Honosný pohřeb se (prozatím) nekoná. *Vesmír* 97: 2 – 3.

PLESNÍK J., 2020. Sudoku nevyluštěna: Kolik druhů žije v současnosti na Zemi? *Ochrana přírody* 1: 36 – 41.

POISOT T., STOUFFER D.B. & GRAVEL D., 2015. Beyond species: why ecological interaction networks vary through space and time. *Oikos* 124(3): 243 – 251.

POKORNÝ J., 2001. Dissipation of solar energy in landscape – controlled by management of water and vegetation. *Renewable Energy* 24: 641 – 645.

POKORNÝ J., 2009. Význam vegetace a vody pro zmírňování klimatické zmeny. *Zpravodaj Ekozemědělci přírodě* 5: 18 – 19.

POKORNÝ J., KVĚT J. & ČEŘOVSKÁ K., 2002. The role of wetlands in energy and material flows in the landscape. In: Květ

J., Jeník J. & Soukupová L. (eds.): Freshwater wetlands and their sustainable future A case study of Třeboň Basin Biosphere Reserve, Czech Republic. UNESCO, Man and Biosphere, Paris, 28: 445 – 462.

POKORNÝ J., BROM J., ČERMÁK J., HESSLEROVÁ P., HURYNA H., NADEZHDINA N. & REJŠKOVÁ A., 2010. Solar energy dissipation and Temperature control by water and plants. *International Journal of Water* 5 (4): 311 – 336.

POLOUČEK P., 2018. Jak definovat život. *Vesmír* 97: 617.

PORTELA A. & ESTELLER M., 2010. Epigenetic modifications and human disease. *Nature Biotechnology* 28: 1057 – 1068.

POTSCHIN M.B. & HAINES-YOUNG R.H., 2011. Ecosystem services. Exploring a geographical perspective. *Progress in Physical Geography* 35 (5): 575 – 594.

POTTS S.G., BIESMEIJER J.C., KREMEN C., NEUMANN P., SCHWEIGER O. & KUNIN W.E., 2010. Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology* & *Evolution* 25: 345 – 353.

POVAŽAN R., 2013. Economic and cultural values related to the Veľká Fatra National Park, Slovakia. In: Getzner M. & Jungmeier M. (eds.): Protected Areas in Focus: Analysis and Evaluation. Series: Proceedings in the Management of Protected Areas, vol. IV., Klagenfurt, s. 80 – 85.

POVAŽAN R., GETZNER M. & ŠVAJDA J., 2014. Value of Ecosystem Services in Mountain National Parks. Case Study of Veľká Fatra National Park (Slovakia). *Polish Journal of Environmental Studies* 23 (5): 1699 – 1710.

POVAŽAN R., GETZNER M. & ŠVAJDA J., 2015. On the valuation of ecosystem services in Muránska Planina National Park (Slovakia). *Journal on Protected Mountain Areas Research and Management* 7 (1): 61 – 69.

POVAŽAN R., FILČÁK R. (eds.), CHRENKO M., MEDERLY P., ŠPULEROVÁ J., IVANEGOVÁ B., KADLEČÍK J., KAPUSTA P., GUSEJNOV S., ŠVAJDA J., ŠŤASTNÝ P., VIESTOVÁ E. & ČERNECKÝ J. 2020. Scenáre pre prírodu Slovenska. Príroda a biodiverzita Slovenska do roku 2050: Alternatívne scenáre a implikácie pre verejné politiky. Ministerstvo životného prostredia SR, Slovenská agentúra životného prostredia, Bratislava, ISBN 978-80-8213-012-9, 114 s.

PRACH K., ŠTECH M. & ŘÍHA P., 2009. Ekologie a rozšíření biomů na Zemi. Scientia, Praha, ISBN 978-80-86960-46-3, 151 s.

PRB, 2018. 2018 World Population Data Sheet. Population Reference Bureau. [online]. cit. 2018-09-20, <https://www.prb.org/wp-content/uploads/2018/08/2018_WPDS.pdf>.

PRB, 2019. 2019 World Population Data Sheet. Population Reference Bureau. [online]. cit. 2019-11-10, <https://www.prb.org/worldpopdata/>.

PRB, 2020. 2020 World Population Data Sheet. Population Reference Bureau. [online]. cit. 2020-07-30, < https://interactives.prb.org/2020-wpds/>.

PRICE D., QVARNSTRÖM A. & IRWIN D.E., 2003. The role of phenotypic plasticity in driving genetic evolution. The Royal Society Publishing. [online]. cit. 2020-06-10, <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspb.2003.2372>.

PRIGOGINE I. & STENGERS I., 1984. Order out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature. Bantam Books, New York, 349 s.

PRIMACK R.B., KINDLMANN P. & JERSÁKOVÁ J., 2011. Úvod do biologie ochrany přírody. Portál, Praha, ISBN 978-80-7367-595-0, 466 s.

PRINCE A., 2012. Silent No More. *Sanctuary, The Journal of Massachusetts Audubon Society,* Spring 2012: 7 – 9.

PROULX R., 2007. Ecological complexity for unifying ecological theory across scales: A field ecologist's Perspective. *Ecological Complexity* 4 (3): 85 – 92.

PULIDO F. & BERTHOLD P., 2004. Microevolutionary response to Climatic Change. *Advances in Ecological Research* 35: 151 – 183.

PYLE R M., 1993. The Thunder Tree: Lessons from an Urban Wildland. Houghton Mifflin, Boston, ISBN-10: 0870716026, 220 s.

PYŠEK P., 2018a. Historie, definice, hypotézy a budoucnost biologických invazí. *Živa* LXVI (5): 210 – 213.

PYŠEK P., 2018b. Rostlinné invaze v současném světe – fakta, příčiny a souvislosti. *Živa* LXVI (5): 214 – 217.

PYŠEK P., PERGL J., ESSL F., LENZNER B., DAWSON W., KREFT H., WEIGELT P., WINTER M., KARTESZ M., NISHINO M., ANTONOVA L.A., BARCELONA J.F., CABEZAS F.J., CÁRDENAS D., CÁRDENAS-TORO J., CASTAŃO N., CHACÓN E., CHATELAIN C., DULLINGER S., EBEL A.L., FIGUEIREDO E., FUENTES N., GENOVESI P., GROOM Q.J., HENDERSON L., INDERJIT, KUPRIYANOV A., MASCIADRI S., MAUREL N., MEERMAN J., MOROZOVA O., MOSER D., NICKRENT D., NOWAK P.M., PAGAD S., PATZELT A., PELSER P.B., SEEBENS H., SHU W., THOMAS J., VELAYOS M., WEBER E.,

WIERINGA J.J., BAPTISTE M.P. & VAN KLEUNEN M., 2017. Naturalized alien flora of the world: species diversity, taxonomic and phylogenetic patterns, geographic distribution and global hotspots of plant invasion. *Preslia* 89: 203 – 274.

QUATTROCHI D.A. & LUVALL J.C., 1999. Thermal infared remote sensing for analysis of landscape ecological processes: methods and applications. *Landscape Ecology* 14 577 – 598.

RAMANKUTTY N., MENRABI Z., WAHA K., JARVIS L., KREMEN C., HERRERO M. & RIESEBERG L.H., 2018. Trends in Global Agricultural Land Use: Implications for Environmental health and Security. *Annual Review of Plant Biology* 69 (1): 789 – 815.

RANDERS J., 2012. 2052 – A Global Forecats For The Next Forty Years – A 5,000 Word Summary. [online], cit. 2018-10-10, <http://www.2052.info/a-5000-word-summary/>.

RAUNKIÆR C. 1934. The life forms of plants and statistical geography. Claredon, Oxford, 632 s.

REES M., 2004. Iba šesť čísel, skryté sily formujúce podobu vesmíru. Kalligram, Bratislava, ISBN 809-7149-507-7, 205 s.

REHAČKOVÁ T. & PAUDITŠOVÁ E., 2007: Metodický postup stanovenia koeficientu ekologickej stability krajiny. *Acta Environmentalica Universitatis Comenianae* 15: 26 – 38.

REITSMA F., 2002. A response to simplifying complexity. *Geoforum* 34: 13 – 16.

REKACEWICZ P., 2006. Freshwater resources: volume by continent. Vital Water Graphics 2. [online]. cit. 2019-10-10, <https://www.grida.no/resources/5608>.

REPISKÝ Ľ., 2013: Zmeny ekologickej stability a vybraných ekosystémových služieb vo vybranom modelovom území v regióne Piešťan. Msc. [diplomová práca], Fakulta prírodných vied, Univerzita Mateja Bela v Banskej Bystrici, Banská Bystrica, 75 s.

RICHARDSON D.M., PYŠEK P., REJMÁNEK M., BARBOUR M.G., PANETTA F.D. & WEST C. J., 2000. Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definition. *Diversity and Distributions* 3(6): 93 – 107.

RIPPLE W.J., ABERNETHY K., BETTS M.G., CHAPRON G., DIRZO R., GALETTI M., LEVI T., LINDSEY P.A., MACDONALD D.W., MACHOVINA B., NEWSOME T.M., PERES C.A., WALLACH A.D., WOLF CH. & YOUNG H., 2016. Bushmeat hunting and extinction risk to the world's mammals. *Royal Society Open Science* 3: 160498.

RITCHIE H. & ROSER M., 2019. Land Use -Our World in Data. Creat. Commons BY. [online], cit. 2019-10-15, <https://ourworldindata.org/land-use>.

ROCKSTRÖM J., STEFFEN W., NOONE K., PERSSON Ĺ, CHAPIN F., LAMBIN E., LENTON T., SCHEFFER M., FOLKE C., SCHELLNHUBER C.J., NYKVIST B., DE WIT C., HUGHES T., VAN DER LEEUW S., RODHE H., SÖRLIN S., SNYDER P., COSTANZA R., SVEDIN U., FALKEN-MARK M., KARLBERG L., CORELL R., FABRY V., HANSEN J., WALKER B., LIVERMAN D., RICHARDSON K., CRUTZEN P. & FOLEY J.A., 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461: 472 – 475.

RODELL M., FAMIGLIETTI J.S., WIESE D.N., REAGER J.T., BEAUDOING H.K., LANDERER F.W. & LO M.-H., 2018. Emerging trends in global freswater availability. *Nature* 557: 651 – 659.

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

ROSZAK T., 1993. The Voice of the Earth. A Touchstone Book, New York, ISBN 0-671-86753, 367 s.

ROSZAK T., 2005. Kde končí pustina, politika a transcedence v postindustriální společnosti. Prostor, Praha, ISBN 80-7260-146-6, 441 s.

RUBIO E., CASELLES V. & BADENAS C., 1997. Emissivity Measurements of Several Soils and Vegetation Types in the 8-14 µm Wave Band. Analysis of Two Field Methods. *Remote Sensing of Environment* 59 (3): 490 – 521.

RUŽIČKA M., 2000. Krajinnoekologické plánovanie - LANDEP I. Združenie Biosféra, Spoločné pracovisko Fakulty prírodných vied UKF v Nitre a Ústavu krajinnej ekológie SAV v Bratislave, Pobočka Nitra, ISBN 80-968030-2-6, 119 s.

RUŽIČKA M., 2002. Systémová ekológia. Učebné texty pre štúdium environmentálnej ekológie. Združenie Biosféra, Bratislava, Spoločné pracovisko Fakulty prírodných vied UKF v Nitre a Ústavu krajinnej ekológie SAV Bratislava, pobočka Nitra, ISBN 80-968030-4-2, 64 s.

SABO P., 2007. Základy teórie ekologickej integrity krajiny a výpočty jej parciálnych indexov (a celku), In: Daniš D. & Jančura P. (eds.): Vybrané problémy krajiny, Zborník Katedry tvorby a plánovania krajiny, Fakulta ekológie a environmentalistiky, Technická univerzita vo Zvolene, Zvolen, ISBN 978-80-89183-30-2, s. 70 – 82.

SABO P., 2013. Dimenzie ekologickej komplexity a hodnotenie jej funkčnej zložky. *Geografická Revue. Geografické a geoekologické štúdie* 9 (Suppl.): 143 – 159.

SABO P., 2014. Koncepcia sociálno-ekologického systému a jej implikácie pre manažment chránených území a biosférických rezervácií. In: Midriak R. & Zaušková Ľ. (eds.): Biosférické rezervácie na Slovensku X. Zborník referátov z 10. národnej konferencie o biosférických rezerváciách Slovenska „Biodiverzita a využívanie krajinných ekosystémov v biosférických rezerváciách UNESCO," konanej v Starej Lesnej 21.–22. októbra 2014, s. 45 – 54.

SABO P., 2016. Rozvoj trvalo neudržateľný roztáča špirálu rizík globálneho kolapsu, nevyhnutná je revízia pôvodnej koncepcie udržateľnosti. In: Zborník zo 6. medzinárodnej vedeckej konferencie Globálne existenciálne riziká 2016, 15. november 2016, Bratislava. Strix,Žilina, ISBN 978-80-89753-10-9, s. 92 – 98.

SABO P., DOBIAŠ V., ORŠIN L., ROSSOVÁ L. & JAKUBEC B., 2007. Výsledky práce partnera projektu o.z. Živá planéta na Úlohe 2: Verifikácia navrhnutej metodiky výpočtu nového indikátora ekologickej stopy miest v kontexte klimatickej zmeny a Úlohe 4: Zmierňovanie impaktov globálneho otepľovania a zvyšovanie kvality života v mestách, šírenie informácií o novej metodike ekologickej stopy. Občianske združenie Živá planéta Piešťany v spolupráci s REC Slovensko, Bratislava a Ústavom vedy a výskumu, Univerzita Mateja Belav Banskej Bystrici, Banská Bystrica, Príloha k správe projektu LIFE04 ENV/SK 000797 „Udržateľný rozvoj miest a zmiernenie vplyvu klimatických zmien v mestskom prostredí" (mapové výstupy), Piešťany, jún 2007, 49 s.

SABO P., HLADKÁ D. & UHLIAROVÁ E., 2009. Využitie koncepcie ekologickej integrity pri výskume Podlavických výmoľov. In: Zaušková Ľ. (ed.): Pustnutie krajiny – ochrana pôdy – krajinná ekológia. Zborník referátov z vedeckého seminára pri príležitosti 70. výročia narodenia prof. Ing. Rudolfa Midriaka, DrSc., Banská Bystrica, 9.9.2009, s. 225 – 239.

SABO P., TURISOVÁ I., UHLIAROVÁ E., ŠVIDROŇ I. & HLADKÁ D., 2011a. 6 Ekologická integrita ekosystémov a krajiny a jej zmeny na vybraných spustnutých pôdach a zalesnených plochách. In: Midriak, R. (ed.): Spustnuté pôdy a pustnutie krajiny Slovenska. Inštitút výskumu krajiny a regiónov, Centrum vedy a výskumu, Univerzita Mateja Bela v Banskej Bystrici, Banská Bystrica, s. 184 – 213.

SABO P., URBAN P., TURISOVÁ I., POVAŽAN R. & HERIAN K., 2011b. Ohrozenie a ochrana biodiverzity. Vybrané kapitoly z globálnych environmentálnych problémov. Inštitút výskumu krajiny a regiónov, Centrum vedy a výskumu, Univerzita Mateja Bela v Banskej Bystrici, Banská Bystrica, ISBN 978-80-968989-6-5, 320 s.

SABO P. & COCHOVÁ S., 2012. Risk of global collapse and new approach to sustainability concepts. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo OstrohradskyiNational University* 5: 135 – 142.

SABO P. & COCHOVÁ S., 2012b. Od Ria k Riu + 20: Nárast rizika globálního kolapsu a jeho hybné sily. In: Rusko M. (ed.): Globálne existenciálne riziká 2012. Zborník z konferencie so zahraničenou účastku, 29.–30. november 2012, Bratislava, ISBN 978-80-89281-86-2, s. 244 – 262.

SABO P. & TOPERCER J., 2012. Ekologické procesy po smršti v NPR Tichá dolina (TANAP) vo svetle termodynamickej teórie ekologických systémov. In: Zborník z IX. národnej konferencie o biosférických rezerváciách Slovenska: *„Zmeny krajiny v biosférických rezerváciách".* Stakčín, 11.–12. októbra 2012, Štátna ochrana prírody SR, Správa NP Poloniny, BR Východné Karpaty, Slovenský výbor Programu UNESCO Človek a biosféra. s. 181 – 193.

SABO P. & REPISKÝ Ľ., 2013. Zmeny ekologickej komplexity a kapacity krajiny poskytovať ekosystémové služby. In: Sviček M. (ed.): Zborník príspevkov z vedeckého seminára Environmentálne indexy, agroenvironmentálne opatrenia a ekosystémové služby v krajine. Výskumný ústav pôdoznalectva a ochrany pôdy, Bratislava, ISBN 978-80-8163-0001-9, s. 45 – 61.

SABO P. & ŠKODOVÁ M., 2016. Indikácia ekologickej komplexity a integrity vybraných nelesných ekosystémov Kriváskej Fatry a ich využitie. In: Vološčuk I. et al.: Dynamika krajinnej štruktúry a diverzita ekosystémov Kriváskej Fatry (monografická štúdia). Vydavateľstvo Univerzity Mateja Bela - Belianum, Banská Bystrica, ISBN 978-80-557-1196-6, s. 117 – 137.

SABO P., TURISOVÁ I., ŠKODOVÁ M., STRIEŽOVSKÁ L. & SNOPKOVÁ Z., 2017. Príspevok k hodnoteniu ekologickej komplexity a integrity ekosystémov. *Quaestiones rerum naturalium* 4 (2): 30 – 105.

SALAWITCH R.J., FAHEY D.W., HEGGLIN M.I., MCBRIDE L.A., TRIBETT W.R. & DOHERTY S.J., 2018. Twenty Questions and Answers About the Ozone Layer: 2018 Update. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 84 s. [online], cit. 2019-09-15, <https://www.esrl.noaa.gov/csl/assessments/ozone/2018/downloads/twentyquestions.pdf>.

SALTHE S.N., 2005. The natural philosophy of ecology: developmental systems ecology. *Ecological Complexity* 2: 1 – 19.

SANDERSON J. & HARRIS L. (eds.), 2000. Landscape ecology. A Top-Down Approach. Lewis Publishers, Boca-Raton, Florida, USA, ISBN 1-56670-368-9, 245 s.

SANIGA M. & BRUCHÁNIK R., 2009. Prírode blízke obhospodarovanie lesa. Národné lesnícke centrum, Zvolen, ISBN 978-80-8093-088-2, 104 s.

dos SANTOS T.R., FERRAGUTI C. & de MATTOS BICUDO C.E., 2018. Relationship among carnivorous macrophyte *Utricularia foliosa* L. and species composition and life forms of periphytic algae community. *Acta Limnologica Brasiliensia* 30: e208.

SASAI Y., 2013. Next-Generation Regenerative Medicine: Organogenesis from Stem Cells in 3D Culture. *Cell Stem Cell* 12 (5): 520 – 530.

SCHRÖDINGER E., 1944. What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell. Based on lectures delivered under the auspices of the Dublin Institute forAdvanced Studies at Trinity College, Dublin, in February 1943. [online]. cit. 2020-06-10, <http://www.whatislife.ie/downloads/What-is-Life.pdf>.

SCHWARZENBACH R.P., ESCHER B.I., FENNER K., HOFSTETTER T.B., JOHNSON C.A. & VON GUNTEN B.W., 2006. The challenge of micropollutants in aquatic systems. *Science* 313: 1072 – 1077.

SCOTT-KAKURES D., 1999. Francis Bacon. In: McGreaL I.P. (ed.): Velké postavy západního myšlení. Prostor, Praha, ISBN 80-7260-002-8, s. 212 – 218.

SEARCHINGER T., HEIMLICH R., HOUGHTON R.A., DONG F., ELOBEID A., FABIOSA J., TOKGOZ S., HAYES D. & YU T.-H., 2008. Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse gases Through Emissions from Land-Use Change. *Science* 319 (5867): 1238 – 1240.

SEED J., MACY J., FLEMING P. & NAESS A., 1993: Myslieť ako hora. Nadácia Zelená alternatíva, Piešťany, ISBN 80-85740-00-1, 123 s.

SELMAN M. & GREENHALGH S., 2002. Eutrophication: Policies, Actions, and Strategies to Address Nutrient Pollution. WRI Policy Note 3, World Resource Institute, 16 s.

SEP, 2015. Emergent Properties. Stanford Encyclopedia of Philosophy. June 3, 2015. [online]. cit. 2019-09-15, <https://plato.stanford.edu/entries/properties-emergent/>.

SEP, 2017. Agri-environment schemes: impacts on the agricultural environment. Science for Environment Policy, Thematic Issue 57. Issue produced for the European Commission by the Science Communication Unit, UWE, Bristol. [online]. cit. 2020-06-10, <https://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/AES_impacts_on_agricultural_environment_57si_en.pdf>.

SERAFIN A. & POGORLEZEC M., 2011. Changes in the flora of the eastern and southern shore area of lake Piaseczno in the years 2003 – 2010. *Acta Agrobotanica* 64 (4): 141 – 150.

SHANTHINI R., 2006. Thermodynamics for Beginners. Science Education Unit, University of Peradeniya, Peradeniya, Sri Lanka, ISBN 955-589-090-0, 338 s.

SHEPHERD G., 2004. The Ecosystem Approach. Five Steps to Implementation. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge UK, ISBN 2-8317-0840-0, 30 s.

SCHNEIDER E.D. & KAY J.J., 1994. Life as a manifestation of the second law of thermodynamics. *Mathematical and Computer Modelling* 19 (6–8): 25 – 48.

SCHUMACHER E.F., 1974. Small is Beautifull. Abacus Press, London, ISBN-13: 978-0856340123, 299 s.

SCHWEITZER A., 1993. Nauka úcty k životu. DharmaGaia, Praha, ISBN 80-901225-7-4, 40 s.

SIMARD S.W., BEILER K.J., BINGHAM M.A., DESLIPPE J.R., PHILIP L.J. & TESTE F.P., 2012. Mycorrhizal networks: Mechanisms, ecology and modelling. *Fungal Biology Reviews* 26 (1): 39 – 60.

SIMPSON D. (ed.), 2007. Climate Action. Sustainable Development International, United Nations Environment Programme, ISBN 978-0-9554408-5-4, 292 s.

SINHA S., 2017. The Fibonacci Numbers and Its Amazing Applications. *International Journal of Engineering Science Invention* 6 (9): 7 – 14.

SKLENIČKA P., 2011. Pronajatá krajina. Nakladatelství Centrum pro krajinu, Říčany, ISBN 978-80-87199-01-5 137 s.

SLAVÍKOVÁ J., 1986. Ekologie rostlin. Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 366 s.

SMETANA V. & ŠIMA P. 2005: Pyrobombus haematurus Kriechbaumer, 1870 – nový druh čmeliaka (Hymenoptera: Bombidae) na Slovensku. *Entomofauna Carpathica* , vol.17, pp. 123-124.

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

SOANE I.D., SCOLOZZI R., GRETTER A. & HUBACEK K., 2012. Exploring Panarchy in Alpine Grasslands: an Application

of Adaptive Cycle Concepts to the Conservation of a Cultural Landscape. *Ecology and Society* 17 (3): 18.

SOKOLÍČKOVÁ Z., 2012. Člověk v pokorném závazku vůči světu. Studie z ekologické etiky. Nakladatelství Pavel Merhaut, Červený Kostelec, ISBN 978-80-7465-042-0, 246 s.

SOLÉ R.V. & MONTOYA J.M., 2001. Complexity and fragility in ecological networks. *Proceedings Royal Society London B* 268: 2039 – 2045.

SPLECHTNA B.E. & GRATZER G., 2005. Natural disturbances in Central European forests: approaches and preliminary result from Rothwald, Austria. *Forest Snow and Landscape Research* 79(1-2): 57 – 67.

STANOVÁ V. & VALACHOVIČ M. (eds.), 2002. Katalóg biotopov Slovenska. Daphne – Inštitút aplikovanej ekológie, Bratislava, ISBN 80-89133-00-2, 225 s.

STARR C., TAGGART R., EVERS CH. & STARR L., 2013. Biology: The Unity and Diversity of Life. 13th Edition. Cengage Learning, ISBN 978-1111425692, 1024 s.

STEFFEN W., SANDERSON A., TYSON P.D., JÄGER J., MATSON P.A., MOORE B., OLDFIELD F., RICHARDSON K., SCHELLNHUBER H.J., TURNER B.L. & WASSON R.J., 2004. Global Change and the Earth System. Executive Summary. IGBP synthesis. International Geosphere-Biosphere Programme, ISBN 91-631-5380-7, 42 s. [online], cit. 2015-12-10, <http://www.igbp.net/publications/igbpbookseries/igbpbookseries/globalchangeandtheearthsystem2004.5.1b8ae20512db692f2a680007462.html>.

STEFFEN W., CRUTZEN P.J. & MCNEI J.R., 2007. The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature? *Ambio* 36 (8): 614 – 621.

STEFFEN W., GRINEVALD J., CRUTZEN P. & MCNEILL J.R., 2011. The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 369: 842 – 867.

STEFFEN W., RICHARDSON K., ROCKSTRÖM J., CORNELL S.E., FETZER I., BENNETT E.M., BIGGS R., CARPENTER S.R., DE VRIES W., DE WIT C.A., FOLKE C., GERTEN D., HEINKE J., MACE G.M., PERSSON L.M., RAMANATHAN V., REYERS B. & SÖRLIN S., 2015a. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347 (6223): 736,1259855.

STEFFEN W., BROADGATE W., DEUTSCH L., GAFFNEY O. & LUDWIG C., 2015b. The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review* 2: 81 – 98.

STEFFEN W., RICHARDSON K., ROCKSTRÖM J., SCHELLNHUBER H.J., DUBE O.P., DUTREUIL S., LENTON T.M. & LUBCHENCO J., 2020. Perspectives. The emergence and evolution of Earth System Science. *Nature Reviews Earth & Environment* 1: 54 – 63.

STEHLE S. & SCHULTZ R., 2015. Agricultural insecticides threaten surface waters at the global scale. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112 (18): 5750 – 5755.

STERCK L., ROMBAUTS S., VANDEPOELE K., ROUZÉ P. & VAN DE PEER Y., 2007. How many genes are there in plants (... and why are they there)? *Current Opinion in Plant Biology* 10: 199 – 203.

STERGACHIS B., HAUGEN E., SHAFER A., FU W., VERNOT B., REYNOLDS A., RAUBITSCHEK A., ZIEGLER S., LEPROUST E.M., AKEY J.M. & STAMATOYANNOPOULOS J.A., 2013. Exonic Transcription Factor Binding Directs Codon Choice and Affects Protein Evolution. *Science* 342 (6164): 1367

STORCH D. & MIHULKA S., 2000. Úvod do současné ekologie. Portál, Praha, ISBN 80-7178-462-1, 156 s.

STRAHLER A. & STRAHLER A., 1997. Physical Geography. John Willey & Sons, Inc., New York, ISBN 0-471-11299-2, 637 s.

STRELCOVÁ K., 2018. Stres suchom a lesné porasty. Správy z výskumu Lesníckej fakulty pre prax, Február 2018: 2 – 9.

STROMBERG P.M., GASPARATOS A., LEE J.S.H., GARCIA-ULLOA J., KOH L.P. & TAKEUCHI K., 2010. Impacts of Liquid Biofuels on Ecosystem Services and Biodiversity. UNU-IAS Policy Report, United Nations University, Institute of Advanced Studies. 51 s., ISBN 978-92-808-4519-8. [online], cit. 2020-06-10, <https://collections.unu.edu/eserv/UNU:2930/Biofuels_e_ver21.pdf#page=6&zoom=auto,-27,224>.

SUDGEN A.M., 2004. Symmetry and speciation. *Science* 303 (5561): 1106.

SUGIHARA G., 2017. Niche Hierarchy: Structure, Organization and Assembly in Natural Systems. J. R. Ross Publ., Plantation, FL, ISBN 978-1-60427-128-7, 208 s.

SULLIVAN A.L., McCAW W.L., CRUZ M.G., MATTHEWS S. & ELLIS P.F., 2020. Fuel, fire weather and fire behavious in Australian ecosystems. CSIRO Ecosystem Sciences, CSIRO Publishing, [online], cit. 2020-01-10, <https://www.researchgate.net/publication/285737241_Fuel_fire_weather_and_fire_behaviour_in_Australian_ecosystems/link/

5876c5ab08ae6eb871cf66dc/download>.

SWAMY V. & PINEDO-VASQUEZ M., 2014. Bushmeat harvest in tropical forests: Knowledge base, gaps and research priorities. Occasional Paper 114. Center for International Forestry Research, Bogor, Indonesia, 29 s. [online], cit. 2020-06-10, <http://www.cifor.org/publications/pdf_files/OccPapers/OP-114.pdf>.

ŠABO M., 2010. Úvod do problematiky hodnotenia prírodných hrozieb. *Acta Geographica Universitatis Comenianae* 54 (2): 193 – 205.

ŠÁLY R. & ŠURINA B., 2002. *Pôdy*. M 1: 500 000. In: Atlas krajiny Slovenskej republiky. MŽP SR Bratislava, SAŽP Banská Bystrica, s. 106.

ŠIBÍK J., SENKO D. & BERNÁTOVÁ D. 2015. Centrá biodiverzity hlavného hrebeňa Krivánskej Malej Fatry. *Bulletin Slovenskej botanickej spoločnosti* 37 (1): 47 – 68.

ŠIMA P. & SMETANA V., 2012: *Bombus* (*Cullumanobombus*) *semenoviellus* (Hymenoptera: Apidae: Bombini) new species for the bumble bee fauna of Slovakia. *Klapalekiana,* 48: 141-147.

ŠMAJS J., 2006. Ohrozená kultúra. Od evolučnej ontológie k ekologickej politike. PRO, Banská Bystrica, ISBN 80-89057-12-8, 221 s.

ŠPULEROVÁ J., ŠTEFUNKOVÁ D., DOBROVODSKÁ M., IZAKOVIČOVÁ Z., KENDERESSY P., VLACHOVIČOVÁ M., LIESKOVSKÝ J., PISCOVÁ V., PETROVIČ F., KANKA R., BAČA A., BARANČOKOVÁ M., BEZÁK P., BEZÁKOVÁ M., BOLTIŽIAR M., MOJSES M., DUBCOVÁ M., GAJDOŠ P., GERHÁTOVÁ K., IZSÓFF M., KALIVODA H., MIKLÓSOVÁ V., DEGRO M., ŠATALOVÁ B., KRIŠTÍN A., DANKANINOVÁ L., KALIVODOVÁ E., MAJZLAN O., MIHÁL I., STAŠIOV S., ŠOLOMEKOVÁ T., AMBROS M. & BALÁŽ I., 2017. Historické štruktúry poľnohospodárskej krajiny Slovenska. VEDA, vydavateľstvo SAV, Bratislava, ISBN 978-80-224-1570-5, 142 s.

ŠTEINER A., HEGYI L., PECHO J., BÉDI E., GOGOLA M., HANUŠIN J., HUDEKOVÁ Z., ČABOUN V., ŠIŠKA B., ZÁBORSKÁ Z., ŠUCHTA J., ŠIROKÝ P., KOZLAYOVÁ A., LEPEŇOVÁ E., SCHVALB M., VARGOVÁ S. & ZAMKOVSKÝ J., 2012. Klimatická zmena výzva pre lokálny rozvoj na Slovensku. Karpatský rozvojový inštitút, Košice, ISBN 978-80-970368-1-2, 179 s.

ŠVAJDA, J., GETZNER, M. & POVAŽAN, R., 2013. Visitors´ perceptions and economic effects of the Tatra National Parks in Poland and Slovakia. In: Šauer P., Dvořák A. & Lisa A. (eds.): Visegrad countries – Environmental Problems and Policies. Cenia Prague, Praha, s. 118 – 126.

ŠVAJDA J., SOLAR J., JANIGA M. & BULIAK M., 2011. Dwarf Pine (*Pinus mugo*) and selected abiotic habitat conditions in the Western Tatra Mountains. *Mountain Research and Development* 31 (3): 220 – 228.

TAINTER J.A., 2009: Kolapsy složitých společností. Nakladatelství Dokorán, Praha, ISBN 978-80-7363-248-9, 319 s.

TANSLEY A.G., 1935. The use and abuse of vegetation concepts and terms. *Ecology* 16: 284 – 307.

TAYLOR J.A. (ed.), 1984. Themes in biogeography. Croom Helm, Kent, ISBN 0-7099-2427-5, 404 s.

TELEKI A. & LACSNÝ B., 2010. Termodynamika. Univerzita Konštantína Filozofa v Nitre, Fakulta prírodných vied, Nitra, 80 s.

TESAŘ M., ŠÍR M., LICHNER Ľ. & ČERMÁK J., 2007. Plant transpiration and net entropy exchange on the Earth´s surface in a Czech watershed. *Biologia* (Bratislava) 62 (5): 547 – 551.

THE UNIVERSITY OF NEW HAMPSHIRE, 2008. Global Carbon cycle. [online], cit. 2020-06-10, <http://globecarboncycle.unh.edu/diagram.shtml>.

THOM R., 1977. Structural Stability, Catastrophe Theory, and Applied Mathematics: The John von Neumann Lecture 1976. *SIAM Review* 19 (2; Apr. 1977): 189 – 201.

TIERNEY G.L.0, FABER-LANGENDOEN D., MITCHELL B.R., SHRIVER W.G. & GIBBS J.P., 2009. Monitoring and evaluating the ecological integrity of forest ecosystems. *Frontiers in Ecology & the Environment* 7: 308 – 316.

TOGNETTI S.S., 1999. Science in a double-blind. *Futures* 31: 689 – 703.

TOKAR D., SOMMER F.T. & D´ESPOSITO M., 2020. A simple method for detecting chaos in nature. *Communications Biology* 3 (11): 1 – 13.

TOMAŠKIN J. & TOMAŠKINOVÁ J., 2018. Produkčné a ekologické funkcie trávnych ekosystémov v poľnohospodárskej krajine. Fakulta prírodných vied UMB v Banskej Bystrici, Banská Bystrica, ISBN 978-80-557-1399-1, 92 s.

TOPERCER J. ml., KLIMENT J. & BERNÁTOVÁ D., 2004. Veternú ružicu asi neotočíme. Ale nezlomíme nad hoľami (pastiersku) palicu? In: Kadlečík J. (ed.): Turiec a Fatra. Zborník príspevkov z konferencie „Hole a horná hranica lesa vo Veľkej Fatre. Problémy, ochrana a využívanie. ŠOP SR, Správa NP Veľká Fatra, Vrútky, s. 47 – 55.

TRENBERTH K.E., FASULLO J.T. & KIEHL J., 2009. Earth´s Global Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* 90 (3): 311 – 324.

TREWAVAS A., 2006. A Brief History of Systems Biology. *The Plant Cell* 18: 2420 – 2430.

TREWAVAS A., 2014. Plant Behaviour and Intelligence. Oxford University Press, Oxford, ISBN 978-0-19-875368-1, 291 s.

TREWAVAS A., 2016. Intelligence, Cognition and Language of Green Plants. *Frontiers in Psychology* 7: 1 – 9.

TUOMISTO H., 2011. Commentary: do we have a consistent terminology for species diversity? Yes, if we choose to use it. *Oecologia* 167: 903 – 911.

TURISOVÁ I., HLADKÁ D., SABO P., MARTINCOVÁ E. & UHLIAROVÁ E., 2010. Kúpeľný park mesta Piešťany a jeho mikroklimatická funkcia. In: Zborník z konferencie Dreviny vo verejnej zeleni 2010, Mestský úrad Banská Bystrica, 22. – 23. 6. 2010, s. 234 – 241.

TURISOVÁ I., SABO P., ŠTRBA T., KORÓNY S., ANDRÁŠ P. & ŠIRKA P., 2016. Analyses of floristic composition of the abandoned Cu-dump field Piesky (Staré Hory Mountains, Slovakia). *Web of Ecology* 6 (1): 97 – 111.

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, 401 s.

TURNER G., 2008. A comparison of the Limits to growth with thirty years of reality. Socio-economics and the Environment in Discussion, CSIRO Working Paper Series 2008-09. CSIRO Sustainable Ecosystems, Canberra, Australia, ISSN 1834-5638, 52 s.

ULANOWICZ R.E., 1999. Life after Newton: an ecological metaphysic. *BioSystems* 50: 127 – 142.

ULANOWICZ R.E., 2004. Quantitative methods for ecological network analysis. *Computational Biology and Chemistry* 28 (5-6): 321 – 339.

ULANOWICZ R.E., JÖRGENSEN S.E. & FATH, B.D., 2006. Exergy, information and aggradation: An ecosystem reconciliation, *Ecological Modelling* 198 (3-4): 520 – 524.

UN, 2015. Sustaiable Development Goals. [online]. cit. 15-09-2019, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>.

UN, 2017. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. [online], cit. 2019-12-15, <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>.

UNEP, 2002. Vital Water Graphics – An Overview of the State of the World's Fresh and Marine Waters. 2nd Edition. UNEP, Nairobi, Kenya, ISBN 92-807-2236-0, 88 s. [online], cit. 2019-12-18, <http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/20624/Vital_water_graphics.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

UNEP, 2009. Vital Water Graphics 2. UNEP, Nairobi, Kenya. [online], cit. 2019-12-18, <https://www.flickr.com/photos/gridarendal/albums/72157675602083763>.

UNEP, 2011. Keeping track of our changing environment: From Rio to Rio+20 (1992-2012). DEWA, Nairobi, Kenya, ISBN 978-92-807-3190-3, 110 s. [online], cit. 2019-12-18, <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8059/-Keeping%20Track%20of%20Our%20Changing%20Environment_%20%20%20From%20Rio%20to%20Rio%2b20%20%281992-2012%29-20111093.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.

UNEP, 2012. Global Environment Outlook 5 (GEO-5): Environment for the future we want. UNEP, Nairobi, Kenya, ISBN 978-92-807-3177-4, 551 s. [online], cit. 2019-12-18, <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8021/GEO5_report_full_en.pdf?sequence=5&isAllowed=y>.

UNEP, 2016. GEO-6 Assessment for the pan-European region. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya. ISBN: 978-92-807-3545-1, 363 s. [online], cit. 2020-06-10, <https://uneplive.unep.org/media/docs/assessments/GEO_6_Assessment_pan_European_region.pdf>.

UNEP, 2019. Global Environment Outlook 6 (GEO-6): Healthy planet, healthy people .UNEP, Cambridge University Press, ISBN 978-1-108-70766-4, 745 s. [online], cit. 2019-12-19, <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/27539/GEO6_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

UNEP & WCMC, 2018. Protected Planet Report 2018. UNEP-WCMC, IUCN and NGS, Cambridge UK and Gland, Switzerland, ISBN 978-92-807-3721-9, 56 s. [online], cit. 2019-02-03, <https://livereport.protectedplanet.net/pdf/Protected_Planet_Report_2018.pdf>.

UNIVERSITY OF WASHINGTON, 2013. Scientists Discover Double Meaning in Genetic Code. *Science Daily*, 12 December 2013. [online], cit. 2019-18-12, <http://www.sciencedaily.com/releases/2013/12/131212142151.htm>.

URBAN P., 2015a. História ochrany prírody na Poľane (Stredné Slovensko) – 1. časť (od najstarších čias do vyhlásenia biosférickej rezervácie). *Quaestiones rerum naturalium* 2(2): 8 – 89.

URBAN P., 2015b. Vybrané kapitoly z ekologického monitoringu. Vydavateľstvo Univerzity Mateja Bela – Belianum, Banská Bystrica, Belianum, 2015. ISBN 978-80-557-0864-5, 130 s.

URBAN P. 2016: História ochrany prírody na Poľane (Stredné Slovensko) – 2. časť (od vyhlásenia biosférickej rezervácie po rok 2016). *Quaestiones rerum naturalium* 3(1): 42-123.

URBAN P., ŠKODOVÁ M., MEZEI A., SAXA A. & ŠVAJDA J., 2015b. Prípadové štúdie z ochrany prírody a krajiny a starostlivosti o prírodné zdroje. Vydavateľstvo Univerzity Mateja Bela – Belianum, Banská Bystrica, ISBN 978-80-557-0958-1, 151 s.

URBAN P., HRÚZ V. & KRIŠTÍN A. 2016. Červený zoznam stavovcov Biosférickej rezervácie Poľana (stredné Slovensko). *Ochrana prírody* (Banská Bystrica) 27: 141 – 154.

URBAN P. SABO P. & PLESNÍK J., 2018. Non-equilibrium thermodynamics and development cycles of temperate natural forest ecosystems. *Folia Oecologica* 45 (2) : 61 – 71.

URBAN P., 2019. Manažment chránených druhov živočíchov. 2. aktualizované a doplnené vydanie. Vydavateľstvo Univerzity Mateja Bela – Belianum, Banská Bystrica, ISBN 978-80-557-1543-8, 211 s.

US DEPT. OF ENERGY, 2008. Carbon Cycling and Biosequestration. Integrating Biology and Climate Through Systems Science. Report from the March 2008 Workshop, U.S. Department of Energy. [online], cit. 2019-10-15, <https://genomicscience.energy.gov/carboncycle/report/CarbonCycle012609HR.pdf>.

USGS, 2016. Earth´s water distribution. United States Geological Survey. [online], cit. 2019-10-12, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth%27s_water_distribution.svg>.

VANDERMEER J. & PERFECTO I., 2018. Ecological complexity and Agroecology. EarthScan from Routledge, New York, ISBN 978-1-138-23197-9, 250 s.

VAN DYNE G.M., 1966. Ecosystems, Systems Ecology, and Systems Ecologists. Oak Ridge National Laboratory, Health Physics Division, Radiation Ecology Section, Union Carbide Corporation, Tennessee, USA, 40 s.

VAN VLIET N., MILNER-GULLAND E.J., BOUSQUET F., SAQALLI M. & NASI R., 2010. Effect of small-scale heterogeneity of prey and hunter distributions on the sustainability of bushmeat hunting. *Conservation Biology* 24 (5): 1327 – 1337.

VARADI F., GHIL M. & KAULA W.M., 1999. Jupiter, Saturn and the edge of chaos. *Icarus* 139: 286 – 294.

VEEN P., JEFFERSON R., DE SMIDT J. & VAN DER STRAATEN J. (eds.), 2009. Grasslands in Europe of high nature value. KNV Publishing, Zeist, ISBN 978-90-5011-316-8, 319 s.

VESTEG M., VACULA R. & KRAJČOVIČ J., 2009. On the Origin of Chloroplasts, Import Mechanisms of Chloroplast-Targeted Proteins, and Loss of Photosynthetic Ability — review. *Folia Microbiologica* 54 (4): 303 – 321.

VICENÍKOVÁ A. & POLÁK P., 2003. Európsky významné biotopy. Daphne – Inštitút aplikovanej ekológie, Bratislava, ISBN 80-89035-24-8, 151 s.

VISSER M.E. & BOTH CH., 2005. Shifts in phenology due to global climate change: the need for a yardstick. *Proceedings of the Royal Society B* 272: 2561 – 2569.

VITALI S., GLATTFELDER J.B., BATTISTON S., 2011. The network of global corporate control. *PLOS One:* 6 (10): e25995.

VITOUSEK P.M., MOONEY H.A., LUBCHENCO J. & MELILLO J.M., 1997. Human Domination of Earth´s Ecosystems. *Science* 277 (5325): 494 – 499.

VLADOVIČ J., 2003. Oblastné východiská a princípy hodnotenia drevinového zloženia a ekologickej stability lesov Slovenska. Príroda, Bratislava, vydané pre Lesnícky výskumný ústav Zvolen, ISBN 80-07-01285-0, 160 s.

VLÁDA SR, 2001. Národná stratégia trvalo udržateľného rozvoja (prijatá vládou SR dňa 10. 10. 2001), [online], cit. 2017-12-15, <https://hpur.vlada.gov.sk/data/files/5636_narodna-strategia-trvalo-udrzatelneho-rozvoja.pdf>.

VOLOŠČUK I., 1996. Obnova ekologickej stability tatranských lesov. *Ochrana prírody* (Banská Bystrica) 14: 203 – 217.

VOLOŠČUK I., 1999. The National Parks and Biosphere Reserves in the Carpathians, The Last Nature Paradises. Association of the Carpathian National Parks and Biosphere Reserves, Tatranská Lomnica, 244 s.

VOLOŠČUK I., 2001. Teoretické a praktické problémy ekologickej stability lesných ekosystémov. Vedecké štúdie 1/2001/A, Technická univerzita vo Zvolene, Zvolen, ISBN 80-228-1050-9, 90 s.

VOLOŠČUK, I., 2005. Ochrana prírody a krajiny. Fakulta ekológie a environmentalistiky, Technická univerzita vo Zvolene, Zvolen, ISBN 80-228-1511-X, 244 s.

VOLOŠČUK I., ŠKODOVÁ M., SABO P. & ŠVAJDA J., 2015. Ekologická charakteristika lesných ekosystémov v oblasti vybraných prírodných katastrof Národného parku Malá Fatra (Západné Karpaty). In: Zborník príspevkov z vedeckého seminára Environmentálne indexy, oblasti ekologického záujmu a ekosystémové služby v krajine. Národné poľnohospodárske a potravinárske centrum – Výskumný ústav pôdoznalectva a ochrany pôdy, ISBN 978-80-8163-009-5, s. 60 – 68.

VOLOŠČUK I., SABO, P., ŠKODOVÁ M., ŠVAJDA J. & LEPEŠKA T., 2016. Dynamika krajinnej štruktúry a diverzita ekosystémov Krivánskej Fatry. Vydavateľstvo Univerzity Mateja Bela – Belianum, Banská Bystrica, ISBN 978-80-557-1196-6, 179 s.

VOLTERRA A., 1926a. Variazioni e fluttuazioni del numero di individui in specie animali conviventi. *Memoria della Reale Accademia Nazionale dei Lincei* 6 (2): 31 – 113.

VOLTERRA V. 1926b. Fluctuations in the abundance of a species considered mathematically. *Nature* 118: 558 – 560.

WACKERNAGEL M., ONISTO L., BELLO P., LINARES A.C., FALFÁN I.S.L., GARCÍA J.M., GUERRERO A.I.S. & GUERRERO G.S., 1999. National natural capital accounting with the ecological footprint concept. *Ecological Economics* 29: 375 – 390.

WAKEFORD T. & WALTERS M., 1995. Science for the Earth. John Wiley & Sons, Chichester, UK, ISBN 0-471-95284-2, 370 s.

WALL G., 2004. National exergy accounting of natural resources. In: Frangopoulos Ch.A. (ed.): Exergy, Energy System Analysis, and Optimization. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford ,UK. [online], cit. 2012-11-15, <http://www.eolss.net>.

WALLS L.D., 2009. Introducing Humboldt´s Cosmos. *Minding Nature* (August 2009): 3 – 15.

WALTNER-TOEWS D. & KAY J., 2005. The evolution of an ecosystem approach: the diamond schematic and an adaptive methodology for ecosystem sustainability and health. *Ecology and Society* 10 (1): 38.

WARSINI S., MILLS J. & USHER K., 2014. Solastalgia: living with the environmental damage caused by natural disasters. *Prehospital and Disaster Medicine* 29(1): 87 – 90.

WCED, 1991. Naše společná budoucnost. Světová komise pro životní prostředí a rozvoj (World Comminssion on Environment and Development). Academie, Praha, ISBN 80-85368-07-2, 297 s.

WENT F.W., 1979. Rostliny. Mladá Fronta, Praha, 197 s.

WESTRA L., MILLER P., KARR J.R., REES W. & ULANOWICZ R., 1999. Ecological integrity and the aims of the global integrity project, 31 s., <www.globalecointegrity.net/pdf/ProjectAims.pdf>

WESTRA L. & LEMONS J., 2007. Perspectives on Ecological Integrity. Environmental Science and Technology Library, Springer, ISBN-13: 978-0792337348, 296 s.

WIENER N., 1965. Cybernetics or control and communication in the animal and the machine. The MIT Press, Cambridge, Massachusets, ISBN 0-262-73009-X, 212 s.

WILKIE D.S., WIELAND M., BOULET H., LE BEL S., VAN VLIET N., CORNELIS D., BRIACWARNON V., NASI R. & FA J.E., 2016. Eating and conserving busmeat in Africa. *African Journal of Ecology* 54: 402 – 414.

WILKINSON D.W., 2007. Fundamental processes in Ecology. Oxford University Press, Oxford. UK, ISBN 978-0-19-922906-2, 182 s.

WIRTSCHAFTSUNIVERSITÄT WIEN, 2018. Material flows by material group, 1970 – 2017. Visualisation based upon the UN IRP Global Material Flows Database. Vienna University of Economics and Business. [online], cit. 2019-11-09, <http://www.materialflows.net/visualisation-centre/>.

WISSMAN J., BERG Å., AHNSTRÖM J., WIKSTRÖM J. & HASUND K.P., 2013. How can the Rural development Programme´s agri-ennvironmental payments be improved? Swedish Board of Agriculture, Jönköping, Sweden, 167 s. [online], cit. 2020-01-15, https://www2.jordbruksverket.se/webdav/files/SJV/trycksaker/Pdf_rapporter/ra13_21.pdf

WITTICH K.P., 1997. Some simple relationships between land-surface emissivity, greenness and the plant cover fraction for use in satelite repote sensing. *International Journal of Biometeorology* 41: 58 – 64.

WOINARSKI J. & BURBIDGE A.A., 2016. *Phascolarctos cinereus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2016: e.T16892A21960344. [online], cit. 2019-10-10, <http://www.iucnredlist.org/details/16892/0>.

WOODLEY S., 2010. Ecological Integrity and Canada´s National Parks. *George Wright Forum* 27: 151 – 160.

WORLD HUNGER, 2015. 2016 World Hunger and Poverty Facts and Statistics. [online], cit. 2017-08-15, <http://www.worldhunger.org/2015-world-hunger-and-poverty-facts-and-statistics/>.

WRI, 2019. We Lost a Football Pitch of Primary Rainforest every 6 Seconds in 2019. World Resource Institute. [online], cit. 2020-06-10, <https://www.wri.org/blog/2020/06/global-tree-cover-loss-data-2019>.

WRI, IUCN & UNEP, 1992. Global biodiversity strategy. Gland, 244 s.

WULF A., 2015. The Invention of Nature: Alexander von Humboldt´s New World. Vintage, ISBN 978-0345806291, 576 s.

WURTZEBACH Z. & SCHULTZ C., 2016. Measuring Ecological Integrity: History, Practical Applications and Research Opportunities. *BioScience* 66 (6): 446 – 457.

WWAP, 2015. Water for a Sustainable World. The United Nations World Water Development Report 2015. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, ISBN 978-92-3-100071-3, 122 s. [online], cit. 2019-15-12, <http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002318/231823E.pdf>.

WWF, 2016. The Living Planet Report 2016. WWF International, Gland, 164 s. [online], cit. 2017-05-10, <http://wwf.panda .org/about_our_earth/all_publications/living_planet_report/2012_lpr/>.

WWF, 2018. The Living Planet Report 2018: Aiming higher. WWF International, Gland, ISBN 978-2-940529-90-2, 144 s. [online], cit. 2019-05-05, **<**https://wwf.panda.org/knowledge_hub/all_publications/living_planet_report_2018/>.

YAM P., 1990. Acacia trees kill antelope in the Transvaal. *Scientific American* 263 (6): 28.

YATES F.E., 1994. Order and Complexity in Dynamical Systems: Homeodynamics as a Generalized Mechanics for BIology. *Mathematical and Computer Modelling* 19 (6-8): 49 – 74.

YU H., CHIN M., YUAN T., BIAN H., REMER L.A., PROSPERO J.M., OMAR A., WINKER D., YANG Y., ZHANG Y., ZHANG Z. & ZHAO CH., 2015. The fertilizing role of African dust in the Amazon rainforest: A first mult iyear assessment based on data from Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations. *Geophysical Research Letters* 42: 1984 – 1991.

YUSUF R.O., NOOR Z.Z., ABBA A.H., HASSAN M.A.A. & DIN M.F.M.D., 2012. Methane emission by sectors: A comprehensive review of emission sources and mitigation methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 5059 – 5070.

ZAH R., BOENI H., GAUCH M., HISCHIER R., LEHMANN M. & WAEGER P., 2007. Life cycle assessment of energy products: environmental impact assessment of biofuels. Empa Technology and Society Lab, Switzerland, 20 s. [online], cit. 2020-06-10, <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21208801>.

ZACHAR D., 2004. Schéma funkcií lesa a lesnej zelene v životnom prostredí – ekosfére. *Acta Universitatis Matthiae Belii*, Séria environmentálna ekológia 6 (1): 85 – 95.

ZALASIEWICZ J., WILLIAMS M., STEFFEN W. & CRUTZEN P., 2010. The new world of Anthropocene. *Environmental Scence and Technology* 44(7): 2228 – 2231.

ZÁHORA J., 2018. Sucho začíná tam, kde končí život v půde. Bioinstitut Olomouc. [online], cit. 2019-10-10, <https://www.youtube.com/watch?v=mlrX0AGpZWg>.

ZELENÝ V., 2012. Rostliny Středozemí. Academia, Praha, ISBN 978-80-200-2088-8, 507 s.

ZHANG H. & WU J., 2002. A statistical thermodynamic model of the organizational order of vegetation. *Ecological Modelling* 153 (1-2): 69 – 80.

ZHANG W., KRAMER E.M. & DAVIS CH.C., 2010. Floral symmetry genes and the origin and maintenance of zygomorphy in a plant-pollinator mutualism. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107: 6388 – 6393.

ŽIGRAI F., 1997. Dimensions of Cultural Landscape (Theoretical, methodological and cultural aspects). In: Proceedings of the II. International Conference on Culture and Environment, Sustainable Cultural Landscape in the Danube-Carpathian Region. UNESCO – Chair for Ecological Awareness & Sustainable Development, Banská Štiavnica, s. 42 – 45.

ŽIGRAI F., 2001. Integrovaný prístup k výskumu kultúrnej krajiny (vybrané teoreticko-metodologické aspekty. In: Zborník referátov zo VI. celoslovenskej konferencie Krajina – Človek - Kultúra, Banská Bystrica, s. 16 – 22.

Vybrané z vyjadrení recenzentov publikácie

„Posudzovaná práca predstavuje originálnu vysokoškolskú učebnicu s rozpracovaním témy systémovej ekológie. Je napísaná na vysokej úrovni s množstvom názorných obrázkov a prehľadných schém, ako aj kvalitných textov. Z hľadiska obsahu je to veľmi aktuálna publikácia zapadajúca do rozvoja systémovej ekológie v slovenských podmienkach. Vedecký prínos autorov vychádza prevažne z doteraz publikovaných údajov a dát nielen v slovenskej literatúre, ale aj vo veľkom rozsahu aj v literatúre zahraničnej.“

Ing. Ján Pavlík, PhD.

„Autori uchopili tému nezvyčajným spôsobom, pri čom podstatnou črtou rukopisu je vedecky zdôvodnené objasnenie a interponovanie polytematických informácií z publikovaných prác predovšetkým zahraničných autorov, ktoré študenti a odborná verejnosť nemusia osobitne vyhľadávať... Nepopierateľná je vysoká aktuálnosť zvolenej témy učebnice... Doteraz u nás a v európskom vedeckom a pedagogickom priestore nebola vydaná podobná učebnica, ktorá by s takou vedeckou erudíciou synteticky jasne interpretovala problematiku a princípy organizácie zložitých živých systémov.“

Prof. Ing. Ivan Vološčuk, DrSc.

„Recenzovanou učebnici Petera Saba a kolektivu nelze hodnotit jinak než jako i v mezinárodním kontextu špičkové, v nejlepším slova smyslu novátorské dílo, přinášející v mnoha ohledech tolik žádoucí racionální pohled na komplexitu nejen ekosystémů, přičemž forma nezaostává za hutným, ale srozumitelným způsobem podaným obsahem. Vyzdvihnout musím především šíři řešené problematiky, nezadávající si s recentními anglosaskými encyklopediemi a vysokoškolskými texty sestavenými mnohem početnějšími autorskými kolektivy.“

RNDr. Jan Plesník, PhD.

ISBN 978-80-557-1728-9