

Modelovanie dopadu globálnych zmien klímy na neurčitosť vývoja biodiverzity a štruktúry ekosystémových služieb lesa

Mindaš, J., Holécý, J., Škvarenina, J.: Modelling Global Climate Change Impact on the Uncertainty of Forest Biodiversity Evolution and the Structure of its Ecosystem Services. *Životné prostredie*, 2017, 51, 1, p. 14–20.

This paper provides concise information on methods used in measuring the observed impact of ongoing climate change on the evolution of tree-species in the composition of forest stands. We include the structure and quality of forest ecosystem services provided. In describing possible future biological diversity changes, the assessment of assumed climate change impact on forest ecosystems is based on global circulation models and corresponding regional climate scenarios. The uncertainty of future climate development is expressed in the more pessimistic SRES A2 and more optimistic SRES B1 emission recommendations by the United Nations Inter-governmental Panel on Climate Change. The selected scenarios enabled prediction of CO₂ levels in the atmosphere and changes in air humidity and soil environment. Herein, the Shannon Biodiversity Index was applied to evaluate assumed biodiversity changes in Low Tatra Mts. forest areas and results show the index increasing from the current 0.4 to 0.9 by 2075. Change in both the quantity and quality of provided forest ecosystem services is expected as a result of uncertainty in its tree-species composition, stock volume and the increasing specific risks in forest land management. Therefore a shift in the managerial paradigm from the present "safe forestry" to the future "risky forestry" is proposed to efficiently limit uncertainty and risks to forest management. Acceptance of this proposal will reduce forest vulnerability to future climate extremes.

Key words: forest ecosystems, climate change scenarios, uncertainty modelling, ecosystem services

Lesy a lesné ekosystémy na jednej strane tvoria dôležitý stabilizačný prvok v krajine, no na druhej strane sú ľudskými vplyvmi výrazne negatívne ovplyvňované. Zmena klímy predstavuje jeden z najväčších globálnych problémov našej modernej civilizácie. Pesimistické pohľady klimatológov, lesníkov, ekológov a krajinárov očakávajú ďalekosiahle následky prejavov klimatickej zmeny v budúcnosti. Predpokladajú sa rozsiahle zmeny areálov rozšírenia rastlín, nekontrolovateľné invázie alochtónnych druhov vrátane škodcov a ich populačné explózie, hrozba aridizácie krajiny vzhľadom na zmeny v jej hydrologickom cykle, ako aj sekundárne následky v podobe lesných a krajinných požiarov či, na druhej strane, rýchlo nastupujúce prívalové povodne spôsobujúce svahové pohyby v oblastiach s tektonickými poruchami alebo nepriaznivou geologickou stavbou (Škvarenina et al., 2010). Dôsledkami uvedených abiotických a biotických rizík sú negatívne dopady na kvalitu, zdravotný stav, rezistenciu a celkovú konštitúciu lesných ekosystémov. Tieto kvalitatívne zmeny vedú k premene, resp. zníženiu produkčných, ako aj ekostabilizačných schopností lesných ekosystémov.

Scenáre klimatickej zmeny – východiská pre modelovanie zmien ekosystémov v krajine

Klimatický scenár je vyjadrenie budúcej klímy s určitou pravdepodobnosťou, ktorá je konštruovaná pre

potreby modelových dopadových štúdií. Klimatické scenáre musia obsahovať antropogénnu zložku klimatickej zmeny s jej prirodzenou variabilitou. V žiadnom prípade klimatické scenáre neposkytujú predpoveď budúceho vývoja klímy, ale poskytujú popis alternatívneho vývoja klímy (resp. vybraných klimatických charakteristík) s definovanou mierou neurčitosti pravdepodobnosti pri platnosti konkrétnych emisných scenárov (SRES) podľa metodiky Medzivládneho panelu OSN pre zmenu klímy (IPCC). Poznanie emisných scenárov pre modelové dopadové štúdie v krajine je veľmi dôležité a neopomenuteľné, nakoľko emisné scenáre explicitne predpokladajú aj určité zmeny vo využívaní krajiny s generovanými emisiami skleníkových plynov.

V súčasnosti sú najpoužívanejšie scenáre klimatickej zmeny založené na globálnych cirkulačných modeloch (GCMs) s prepojením atmosféricko-oceánskych cirkulačných systémov. Tieto modely poskytujú štatistické charakteristiky a časové rady vybraných klimatických parametrov v tzv. uzlových bodoch, ktoré sú od seba vzdialené aj stovky kilometrov. Na spresnenie výstupov týchto modelov je možné využiť regionálne klimatické modely, ktoré ako keby boli vnorené do siete GCMs vo vymedzenej oblasti, kde výstupy z GCMs predstavujú okrajové, resp. počiatočné hodnoty pre regionálny klimatický model s vyššou hustotou uzlových bodov (10 – 20 km) a reálnejšou topografiou. Regionálne modely

modifikujú klimatické reakcie planétarnej až subkontinentálnej mierky tak, aby sa zrealizovali fyzikálne efekty topografie. Regionálne klimatické scenáre však nemôžu ísť nad rámec presnosti a fyzikálnej konzistentnosti základných modelov GCMs.

Ďalšou možnosťou je štatistický *downscaling*, ktorý využíva vzájomné vzťahy medzi predikovanými veličinami (žiarenie, teplota vzduchu, zrážky) a ďalšími klimatickými, resp. bioklimatickými veličinami potrebnými pre modelové dopadové štúdie (napr. charakteristiky snehovej pokrývky, fenologické charakteristiky, teplota pôdy a pod.). Štatistické nástroje *downscalingu* spravidla vychádzajú z poznaných vzťahov zistených z existujúcich pozorovaní (napr. regresné vzťahy medzi teplotou a dĺžkou trvania snehovej pokrývky a pod.). Treba však upozorniť, že rozdiely GCMs výstupov, výstupov regionálnych modelov a štatistického *downscalingu* môžu byť značné (aj pre ten istý emisný scenár), a preto je vhodné, aby súčasťou týchto štúdií boli jednoznačne identifikované zdroje klimatických dát.

Pri výbere klimatického scenára ako základného dátového vstupu pre modelové dopadové štúdie je potrebné dodržať niekoľko zásad (Huth a kol., 2003; Lapin, Melo, 2004):

1. musí byť dodržaná konzistencia regionálnych scenárov zmeny klímy s globálnymi projekciami;
2. scenáre zmien regionálnej klímy môžu ísť aj mimo rámca globálnych modelov, musí však byť dodržaná zásada fyzikálnej konzistencie klimatických procesov a konzistencie vzťahov medzi klimatickými veličinami;
3. klimatické scenáre musia poskytovať vhodnú časovú a priestorovú škálu klimatických charakteristík využiteľných pre modelové dopadové štúdie, resp. ako vstupy do ďalších modelov (napr. produkčných, biogeochemických a pod.);
4. aplikované scenáre musia byť reprezentatívne pre daný segment krajiny (odporúča sa priama komunikácia s klimatológmi pri príprave takýchto štúdií) a scenáre by mali byť dostupné a podľa možnosti overené národnou autoritou (napr. Slovenským hydrometeorologickým ústavom (SHMÚ) alebo Ministerstvom životného prostredia SR, ktoré ako zastrešujúci štátny orgán zodpovedá za problematiku zmeny klímy vrátane modelových dopadových a adaptačných štúdií na národnej úrovni).

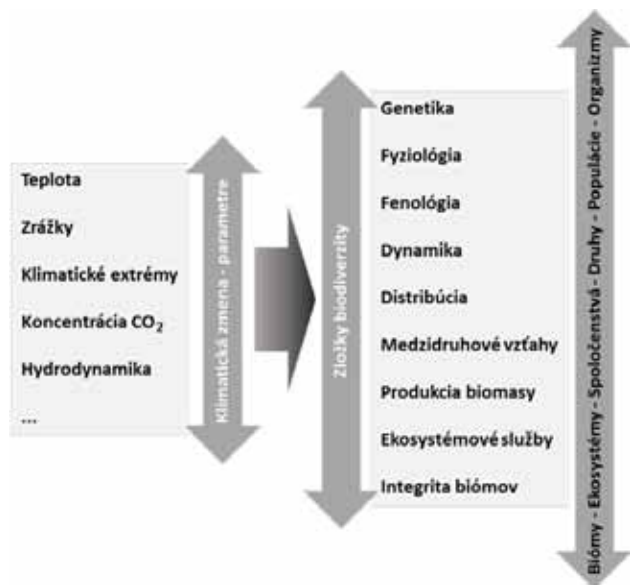
V roku 2010 navrhol SHMÚ po konzultácii s uvedeným ministerstvom projekt s názvom *Národný klimatický program 2011 – Adaptácie na klimatickú zmenu*, v rámci ktorého mali byť spracované nové klimatické scenáre pre Slovensko na báze výstupov najnovších modelov GCMs a tiež výstupov regionálnych cirkulačných modelov (RCMs). Na prípravu najnovších scenárov klimatickej zmeny pre Slovensko použili spracovatelia z oddelenia meteorológie a klimatológie Katedry astronómie, fyziky Zeme a meteorológie Fakulty matematiky, fyziky

a informatiky Univerzity Komenského v roku 2011 štyri modely všeobecnej cirkulácie atmosféry (GCMs), pričom dva z nich sú globálne (kanadský CGCM3.1 a nemecký ECHAM5) a dva regionálne (holandský KNMI a nemecký MPI). Všetky modely majú vo výstupoch denné hodnoty viacerých prvkov od roku 1951 až do roku 2100. Uvedené modely a výstupy boli vybrané na základe podrobnej analýzy dvadsiatich rôznych modelov, z ktorých bolo pätnásť RCMs a päť GCMs. Celé riešenie týchto klimatických scenárov prebiehalo v úzkej spolupráci s SHMÚ a bral sa ohľad aj na iné podobné spracovania v zahraničí.

Uvedené modely GCMs a RCMs patria do najnovšej kategórie prepojených atmosféricko-oceánskych modelov s viac ako desiatimi atmosférickými výškovými hladinami a viac ako dvadsiatimi oceánskymi hĺbkami výpočtu premenných v sieti uzlových bodov. Model CGCM3.1 má v blízkosti Slovenska deväť uzlových bodov, model ECHAM5 má v blízkosti Slovenska dvanásť uzlových bodov štvorcovej siete (asi 200 x 200 km) s úmerne tomu zjednodušenou orografiou. Regionálne modely KNMI a MPI predstavujú detailnejšiu integráciu dynamických rovníc atmosférickej a oceánskej cirkulácie v sieti uzlových bodov vo vzdialenosti 25 x 25 km, pričom okrajové podmienky riešenia rovníc preberajú z výstupov globálneho modelu ECHAM5. V priestore Slovenska majú modely KNMI a MPI až 19 x 10 uzlových bodov a celkom reálnu orografiu s dobrým vyjadrením všetkých pohorí s väčším horizontálnym rozmerom ako 25 km.

Rozhodujúcim krokom bol výber emisných scenárov. V súlade s predchádzajúcimi štúdiami a odporúčaním IPCC bol vybraný ako pesimistickejší emisný scenár SRES A2 a optimistickejší scenár SRES B1. Informáciu o neurčitosti budúceho vývoja klímy na Slovensku nám poskytli práve tieto dva scenáre. Regionálne modely používajú stredne pesimistický emisný scenár SRES A1B, ktorý dáva hodnoty klimatických prvkov po roku 2040 medzi scenáre SRES B1 (stredne nízka emisia skleníkových plynov) a A2 (stredne vysoká emisia skleníkových plynov). Scenár A1B sme použili aj pre kanadský CGCM3.1. Do roku 2040 sú všetky scenáre SRES blízke, teda v pomerne úzkom intervale globálnej emisie skleníkových plynov. Celosvetová emisia fosílného uhlíka 28,9 Gt (mld. t) v roku 2100 sa predpokladá podľa SRES A2 (kumulatívne od roku 1990 až 1 773 Gt) a 5,2 Gt podľa SRES B1 (kumulatívne 989 Gt), A1B je stredne pesimistický scenár s globálnym oteplením o 2,9 °C, A2 s oteplením o 3,8 °C a B1 s oteplením o 2,0 °C do roku 2100 v porovnaní s rokom 1990 (Lapin et al., 2011).

Priama aplikácia výstupov klimatických scenárov pre modely reakcie lesných ekosystémov na budúce, resp. očakávané klimatické podmienky nie je vždy jednoduchá. Komplexnejšie modely lesných ekosystémov spravidla vyžadujú oveľa širšiu škálu vstupných dát, ako poskytujú klimatické scenáre (napr. zmeny che-



Obr. 1. Sumarizácia modelových aspektov zmeny klímy a ich pravdepodobných efektov na rôzne úrovne biodiverzity. Zdroj: upravené podľa Bellard et al. (2012)

mických parametrov ovzdušia, nie len koncentráciu CO₂, zmeny pôdneho prostredia – vplyv zmeny teploty a vlhkosti pôdy na pôdnu respiráciu, koeficienty zvetrávania a pod.). Z týchto dôvodov sa preto pristupuje k určitej parametrizácii a generalizácii modelových dopadových štúdií adekvátne kvalite a kvantite vstupných klimatických parametrov a kvalite extrapolácií našich znalostí (Shugart et al., 2003). Neurčitosti ohľadom regionálnych zmien klímy v GCMs sú dôležitým zdrojom neistoty aj pri hodnotení vplyvu zmeny klímy na lesy a lesné ekosystémy. GCMs výstupy taktiež zatiaľ neposkytujú dostatok podkladov na modelovanie rizika prírodných disturbancií a hazardov, ktoré sú pre lesné ekosystémy v krajine často rozhodujúce (silné búrky, víchrice a pod.).

V súčasnosti je modelovanie vplyvov zmeny klímy orientované najmä na (Shugart et al., 2003):

- modely zmien stanovištných podmienok (biotopu);
- modelovanie druhových zmien lesných ekosystémov;
- modelovanie zmien produkcie biomasy a modely orientované na zmeny komplexných interakcií medzi jednotlivými komponentmi ekosystému (napr. zmeny trofických vzťahov a pod.).

Samostatnou oblasťou sú nadstavbové modely, ktoré sa snažia modelovať zmeny na úrovni ekosystémových služieb lesa (Matthews et al., 2014).

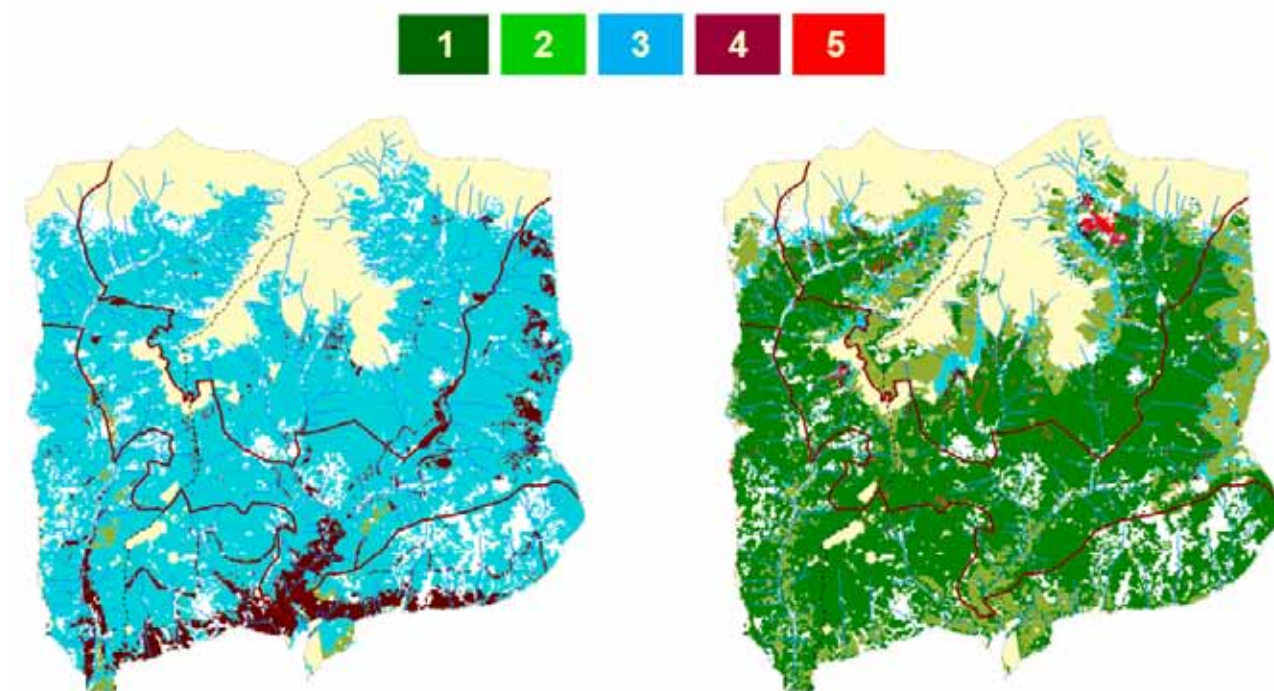
Klimatická zmena a biodiverzita lesných ekosystémov

Ekológovia v súčasnosti intenzívne rozvíjajú metódy a modely na lepšie pochopenie mechanizmov, ktoré determinujú distribúciu druhov v priestore a čase,

kde sa hnacie mechanizmy viažu na klimatické procesy (obr. 1). Vo všeobecnosti sa predpokladá, že životný cyklus jednotlivých druhov a biocenóza sa bude meniť prostredníctvom zmeny biotopu, zmeny trofických sietí a zmien funkcionality lesných ekosystémov. Doterajšie poznatky sa pretavili aj do niektorých matematických modelov, ktoré umožňujú modelovať niektoré aspekty biodiverzity, ako distribúciu, abundanciu či mortalitu druhov vo väzbe na klimatické zmeny.

Na globálnej úrovni tieto modely ukazujú znepokojivé dôsledky pre biodiverzitu a pri najnepriaznivejších scenároch dokumentujú dramatický zánik druhov, ktoré možno považovať za šiesty masový zánik v histórii Zeme (Barnosky et al., 2011). Avšak všetky súčasné prístupy majú vážne medzery z hľadiska nedostatku poznania viacerých kľúčových mechanizmov dopadu zmeny klímy na biodiverzitu, čo môže viesť buď k veľmi veľkému podhodnoteniu či, naopak, nadhodnoteniu rizík pre biodiverzitu. Zlepšenie existujúcich modelov a najmä nové generácie modelov musia riešiť detailné kauzálne závislosti s hlavným cieľom znižovať neurčitosti, resp. neistoty modelových výstupov. Je tiež veľmi dôležité zlepšiť naše chápanie zraniteľnosti biodiverzity spôsobenej zmenou klímy a vyvíjať ďalšie prediktívne prístupy s cieľom ísť nad rámec jednoduchých predpovedí (Bellard et al., 2012).

V súčasnosti môžeme pozorovať trend modelovania zmien biodiverzity na regionálnej až lokálnej úrovni s vyššou úrovňou poznania kauzálnych vzťahov v rámci klimatu, biotopu a geobiocenózy. V dôsledku toho získavame vernejší a pravdepodobnejší obraz o zmenách biodiverzity v konkrétnych segmentoch krajiny pre presne definované charakteristiky ekosystémov. Príkladom môžu byť analýzy možných zmien vybraných indexov biodiverzity, ktoré sme modelovo riešili v oblasti Nízkych Tatier (obr. 2). V danej lokalite sa aplikoval lineárny regresný model ($\alpha = 0,01$) pre výpočet potenciálnej zmeny v indexoch biodiverzity (Shannon, 1948; Hill, 1973). Na obr. 3 sú ilustrované výsledky modelových zmien Shannonovho indexu biodiverzity pre drevinovú zložku v oblasti horských lesov Nízkych Tatier. Súčasná úroveň rozmanitosti Shannonovho indexu sa pohybuje okolo 0,4 (extrémne nízka diverzita), čo korešponduje s poznatkami diverzity drevinových druhov pod hornou hranicou lesa (Körner, 1995). Výsledky regresného modelu ukázali, že hodnota indexu v dôsledku zvyšujúcej sa teploty vzduchu narastá a pre časový horizont 2075 dosiahne úroveň blízku 1,0, čo je hraničná hodnota pre stredne nízku úroveň diverzity. V prípade pôvodného drevinového zloženia sa dosahuje ešte vyššia úroveň hodnoty Shannonovho indexu (okolo 0,9) a zvýšenie teploty vzduchu zvyšuje hodnotu indexu až na hodnotu 1,2, pričom potenciálna hodnota indexu v horizonte roku 2100 by mohla dosiahnuť úroveň stredne vysokej rozmanitosti (obr. 3). Výsledky analýzy oboch spomínaných indexov ukazujú na rastúci poten-

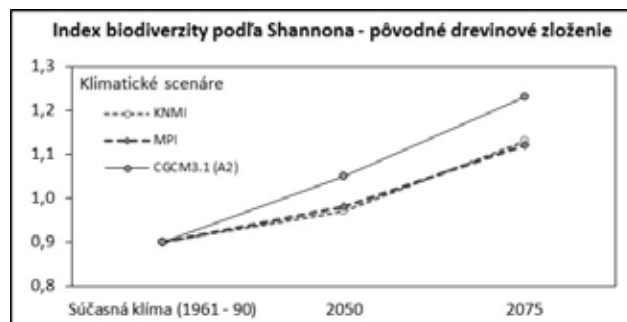
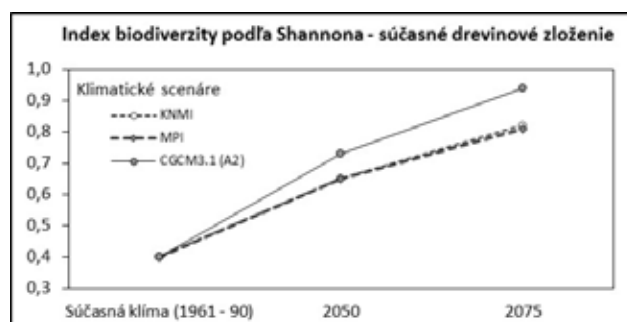


Obr. 2. Modelové riešenie vplyvu klimatických zmien a klimatických nárokov na diverzitu lesných drevín ako podklad hodnotenia ekologickej stability lesných ekosystémov v modelovom území Lomnistej a Vajskovskej doliny (Nízke Tatry)

Vysvetlivky: Bioklimatické podmienky: 1 – optimálne, 2 – priaznivé, 3 – nepriaznivé, 4 – veľmi nepriaznivé, 5 – nevhodné

ciál diverzity drevín v konkrétnych podmienkach horských lesov Nízkych Tatier (obr. na str. 2 obálky). Tieto výsledky boli podporené aj aplikáciou dynamických modelov vývoja lesa (Mindaš, Škvareninová, 2016).

Ďalším krokom pri modelovaní vplyvu globálnych klimatických zmien na biodiverzitu je priestorové modelovanie s využitím nástrojov geografických informačných systémov (GIS). Na základe dostatočnej bázy dát vyjadrených prostredníctvom individuálnych informačných vrstiev (georeliéfu, pôdných typov, lesných typov, drevinového zloženia, klimatických charakteristík a pod.) je možné vytvárať komplexnejšie modely hodnotiace napr. ekologickú stabilitu lesných ekosystémov (Vladovič, 2003). Takýto prístup môžeme demonštrovať v rámci prípadovej štúdie hodnotenia ekologickej stability lesov v oblasti Lomnistej a Vajskovskej doliny v Nízkych Tatrách. Parciálnou zložkou bolo kreovanie samostatnej vrstvy vplyvu klimatickej zmeny na lesné dreviny s využitím poznania ich klimatických nárokov (Mindaš, Škvarenina, eds., 2003). Výsledky sú prezentované na obr. 3, kde sa plošná diferenciácia klimatických nárokov lesných drevín ako hlavnej diverzitetnej zložky lesných ekosystémov vyjadruje v relatívnej stupnici 1 – 5. Hodnota 1 zodpovedá stavu výskytu dreviny vo svojom klimatickom optime, naproti tomu hodnota 5 zodpovedá podmienkam výskytu dreviny mimo jej prirodzeného klimatického areálu v oblasti Západných



Obr. 3. Modelovanie vplyvu klimatickej zmeny na biodiverzitu horských lesov v oblasti Nízkych Tatier. Zdroj: Mindaš et al. (2016)



Obr. 4. Horské lesné ekosystémy predstavujú mimoriadne cenné spoločenstvá vyznačujúce sa špecifickou biodiverzitou a cennými všeužitočnými funkciami, napr. hydrickou, vodoochrannou, protieróznou (masív Osobitej v Západných Tatrách, kde horské porasty smreka a kosodreviny pomáhajú zabezpečiť zvlášť významnú protilavínovú funkciu, január 2016). Foto: Jaroslav Škvarenina

Karpát. Východisková situácia pre podmienky súčasnej klímy dokumentuje relatívne priaznivý stav vyjadrujúci súlad reálneho výskytu lesných drevín s ich klimatickými nárokmi. Klimatická zmena v tomto prípade znamená pre dreviny výrazný posun bioklimatických podmienok smerom ku klimatickému pesimu, čo potenciálne môže viesť k zníženiu ekologickej stability lesných porastov v tejto lokalite.

Klimatická zmena a ekosystémové služby lesa

Rozvoj a integrácia v lesníckom sektore vytvárajú potrebu a zároveň predpoklady na vznik nového pohľadu na lesníctvo a jeho manažment aj cez prizmu ekosystémových služieb lesov. V podmienkach meniacej sa krajiny prírodné lesy v bezzásahovom režime predstavujú len cca 1,5 % rozlohy lesného pôdneho fondu (LPF) v Európe a na Slovensku. Zvyšok LPF tvoria lesy prirodzené, monokultúry a v súčasnosti aj plantáže rýchlorastúcich drevín. Ekosystémové služby lesov na cca 98 % LPF tak musia byť vytvárané, udržiavané, revitalizované a optimalizované najprogressívnejšími, resp. kvalitatívne novými lesníckymi prístupmi. Ekosystémové služby lesov predstavujú systém zabezpečovania vyváženého súboru ekologických a socioekonomických prínosov lesných ekosystémov a biosystémov pre spoločnosť v priestore a čase. V zmysle dokumentov EÚ o CICES (*Common International Classification of Ecosystem Services*, Spoločná medzinárodná klasifikácia ekosystémových služieb) ide o zásobovacie (napr. drevo a lesné plody), regulačné a podporné (napr. regulácia biogeochemických cyklov, zachovanie genetickej diverzity) a kultúrne (kognitívna,

rekreačná) funkcie, ktoré musia byť v súčasnosti zabezpečované v podmienkach globálnych zmien prírodného prostredia a socioekonomického rámca. Tento rámec v súčasnosti akceptuje na účely environmentálneho účtovníctva aj OSN a pojmovo bol ukotvený aj v pripravovanej novele zákona č. 543/2002 Z. z. o ochrane prírody a krajiny. Ekosystémové služby lesov v súčasnosti figurujú ako významná, samostatná a rýchlo sa rozvíjajúca časť lesníctva aj v zásadných dokumentoch ďalších svetových organizácií – FAO (Organizácie pre výživu a poľnohospodárstvo), UNEP (Programu Spojených národov pre životné prostredie), WHO (Svetovej zdravotníckej organizácie). Predmetom študijného odboru ekosystémové služby lesov je výskum a štúdium pokročilých integrovaných prístupov orientovaných na etablovanie, cieľavedomé ovplyvňovanie, udržiavanie a ochranu, ako aj na cieľavedomé a udržateľné využívanie ekosystémových funkcií v rámci adaptívnych lesných ekosystémov.

Tradičné lesníctvo je zamerané hlavne na súhrn praktických poznatkov a úkonov týkajúcich sa lesa a lesného hospodárstva s orientáciou na pestovanie lesných kultúr, ich výsadbu, ťažbu dreva a ostatné činnosti zamerané hlavne na využívanie produkčnej funkcie lesa v relatívne stálych podmienkach prostredia. Rozdiel teda spočíva aj v spôsobe zabezpečenia ekosystémových služieb ako širokého spektra úžitkov, ktoré spoločnosť získava z lesných ekosystémov, a to v meniacich sa podmienkach prírodného prostredia. Hospodárenie v lesoch preto rieši aj otázku adaptácie na riziko a zraniteľnosť ekosystémových služieb, ako aj problémy ich socioekonomického a sektorovo-politického zabezpečenia. Týmito aktivitami sa tradičné a trhovo orientované lesníctvo mohlo zaoberať len okrajovo, pretože to nepatrí k jeho ťažiskovým ekonomickým činnostiam. Je potrebné prejsť k mysleniu a koncepcii komplexných adaptívnych ekosystémov. Samotný obsah termínu ekosystémové služby lesov sa vyvinul z lesníckeho termínu funkcie lesa, vzhľadom na vývoj poznania však dosiahol kvalitatívne novú obsahovú a štruktúrnu úroveň tým, že okrem funkcie poskytovania obnoviteľných prírodných zdrojov (drevo) zahŕňa tiež podporné funkcie (t. j. služby potrebné pre ostatné služby, napr. kolobeh živín, fotosyntéza), regulačné (t. j. ovplyvňujúce prírodné procesy, ako rozklad toxických látok, čistenie vody, ukladanie uhlíka) a kultúrne (nemateriálne služby, ako estetické hodnoty krajiny, rekreácia, veda a i.). Ako o tom informuje Perrings (2010), ekosystémové služby obsahujú ekologické i socioekonomické a kultúrne aspekty lesných ekosystémov.

Modelovanie dopadov klimatických zmien na ekosystémové služby stredoeurópskych temperátnych lesov by malo v princípe brať do úvahy nasledujúce javy:

1. neurčitosť produkcie lesa (zmenu klimatických a prírodných podmienok, zmenu koncentrácie CO₂, depozíciu dusíka a i. až po zmenu drevinového zloženia lesov);
2. zvyšovanie špecifického rizika hospodárenia na

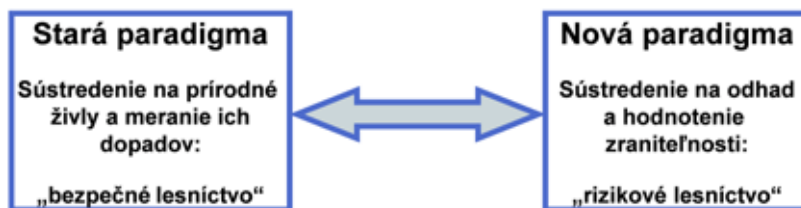
lesnej pôde (rast poveternostných extrémov vyvolaných meniacou sa klímou, veterné kalamity, sucho, lesné požiare, gradácie hmyzích a hubových patogénov a i.);

- zmenu funkčných efektov ekosystémových služieb lesa (napr. zmenu produkčných a vŕejitočných funkcií lesov; obr. 4).

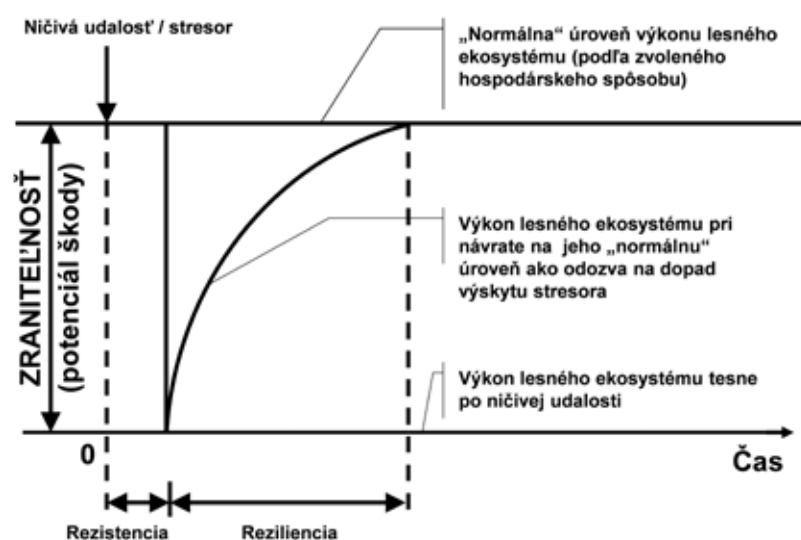
Kľúčom k efektívnemu zvládnutiu neurčitosti a rizika vývoja lesných ekosystémov v súčasnosti je však nutnosť zmeny paradigmy hospodárenia na lesnej pôde (obr. 5). Ide tu o aktívne využitie informácie o dopade rizika a neurčitosti vývoja ekosystémov pri realizácii projektov trvale udržateľného lesníctva, ktorých základom majú byť adaptačné opatrenia hospodárskej úpravy lesov na nastupujúcu zmenu klímy. Cieľom a kritériom efektívnosti zvolených hospodárskych opatrení tak, ako ich vysvetľuje Locatelli (2016), musí byť zníženie zraniteľnosti lesných ekosystémov pri výskyte klimatických extrémov (obr. 6). Definície zraniteľnosti ekosystémov uvádza napríklad Thywissenová (2006) a problematiku merna tejto veličiny vrátane výsledkov jej experimentálneho znižovania opisuje Birkmann (ed., 2006). O modeloch zraniteľnosti lesa vetrom spolu s výsledkami simulácie jej znižovania prostredníctvom opatrení priestorovej úpravy lesa informujú tiež Agster, Ruck (2004).

Hospodárenie v podmienkach neurčitosti vývoja okolitého sveta opisuje rozhodovacie situácie, keď je známa konkrétna hrozba pre ekosystém, ale chýba informácia o pravdepodobnosti jej výskytu. Takouto hrozbou pre lesníctvo je napríklad zmena drevinového zloženia lesných porastov, zníženie prírastku biomasy alebo aj kvality vyrobeného dreva. Rozhodovanie v podmienkach rizika hospodárenia potom označuje situácie, keď je známa pravdepodobnosť výskytu zničenia ekosystému v čase. Vplyv neurčitosti a rizika na projekty využívania obnoviteľných prírodných zdrojov v čase je principiálne odlišný. Pokiaľ vplyv neurčitosti vývoja uvažovaných procesov na ekosystém je v čase konštantný, riziko zničenia ekosystému v čase vždy len stúpa. Táto skutočnosť vyplýva priamo z matematickej definície pravdepodobnosti. Z tohto hľadiska má pre lesníctvo veľký význam jedna z možných definícií rizika hospodárenia, o ktorej informuje Thywissenová (2006):

Riziko = pravdepodobnosť výskytu prírodného živlu x zraniteľnosť



Obr. 5. Opis zmeny paradigmy hospodárenia na lesnej pôde s cieľom znížiť zraniteľnosť lesných ekosystémov a zvýšiť efektívnu adaptáciu na špecifické riziko lesníckych projektov



Obr. 6. Definícia zraniteľnosti ekosystému prírodnými živlami ako funkcie jeho rezistencie a reziliencie

Z takto filozoficky chápanej definície rizika je zrejmé, že špecifické riziko hospodárenia na lesnej pôde možno znížiť práve efektívnym posilňovaním rezistencie a reziliencie lesných ekosystémov, ktoré znižujú ich zraniteľnosť jednotlivými prírodnými živlami. Interakcia rizika a neurčitosti vývoja lesných ekosystémov má významný dopad na množstvo i kvalitu efektov, ktoré očakávame od poskytovaných ekosystémových služieb. Pri zmene drevinového zloženia lesných porastov v podmienkach neurčitosti jeho vývoja sa v súčasnosti mení nielen kvalita poskytovaného dreva (stúpa podiel listnatých drevín), ale znižuje sa tiež ich vodohospodársky protipovodňový efekt, pretože pri topení snehu na jar sú listnaté stromy ešte bez asimilačných orgánov a slabo chránia pôdu pred priamym slnečným žiarením.

* * *

Stredoeurópske ekosystémy sú v súčasnosti vystavené neustále rastúcemu antropogénnemu tlaku. Ten vychádza z rastu nárokov spoločnosti na životnú úroveň spájanú s materiálnou a teritoriálnou expanznou

činnosťou človeka, ktorá priamo postihuje lesné ekosystémy, ktoré sú nevyhnutné na udržanie ekologickej stability krajiny, a tým aj na zachovanie priaznivého stavu životného prostredia. Priamym dôsledkom je oslabovanie a chradnutie lesov doslova na veľkoplášnej úrovni. Nespočetné analýzy a štúdie dokazujú, že temperátne lesy v strednej Európe sú čoraz citlivejšie na kardinálny problém súčasnosti – klimatickú zmenu. Trendom vo výskumnom smerovaní je práve osvetlenie dopadov rýchlo sa meniacich klimatických podmienok na biodiverzitu a zmeny v poskytovaní ekosystémových služieb lesov.

Výskumné práce opísané v tomto príspevku sa vykonali ako súčasť výskumných projektov č. 1/0570/16 a 1/0589/15 podporených Vedeckou grantovou agentúrou MŠVVaŠ SR a SAV a projektu APVV-15-0425. Zber údajov pre vykonané analýzy sa uskutočnil vďaka prostriedkom projektu č. 1/0589/15 podporeného Vedeckou grantovou agentúrou MŠVVaŠ SR a SAV.

Literatúra

- Agster, W., Ruck, B.: Wind Tunnel Experiments with Porous Model Forests. In: Malzahn, D., Plapp, T. (eds.): Disasters and Society – From Hazard Assessment to Risk Reduction. Berlin: Logos Verlag, 2004, 414 p.
- Barnosky, A. D., Matzke, N., Tomiya, S., Wogan, G. O. U., Swartz, B., Quental, T. B. et al.: Has the Earth's Sixth Mass Extinction Already Arrived? *Nature*, 2011, 471, p. 51 – 57.
- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., Courchamp, F.: Impacts of Climate Change on the Future of Biodiversity. *Ecology Letters*, 2012, 15, 4, p. 365 – 377.
- Birkmann, J. (ed.): Measuring Vulnerability to Natural Hazards – Towards Disaster-Resilient Societies. Tokyo, New York: UNU Press, 2006, 522 p.
- Hill, M. O.: Diversity and Evenness: A Unifying Notation and its Consequences. *Ecology*, 1973, 54, 2, p. 427 – 432.
- Huth, R., Metelka, L., Halenka, T., Mládek, R., Huthová, Z., Janoušek, M., Kalvová, J., Kliegrová, S., Kyselý, J., Pokorná, L., Sedlák, P.: Regionální klimatické modelování v České republice – projekt ALADIN-Climate. Meteorologické zprávy, 2003, 56, 4, s. 97 – 103.
- Körner, Ch.: Alpine Plant Diversity: A Global Survey and Functional Interpretations. In: Chapin, F. S., Körner, Ch. (eds.): Arctic and Alpine Biodiversity: Patterns, Causes and Ecosystem Consequences. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1995, p. 45 – 62.
- Lapin, M., Melo, M.: Methods of Climate Change Scenarios Projection in Slovakia and Selected Results. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2004, 52, 4, p. 224 – 238.
- Lapin M., et al.: 3. Scenáre klimatickej zmeny na Slovensku. In: Mindaš, J., Páleník, V., Nejedlík, P. (eds.): Dôsledky klimatickej zmeny a možné adaptačné opatrenia v jednotlivých sektoroch. Záverečná správa projektu. Zvolen: EFRA – Vedecká agentúra pre ekológiu a lesníctvo, 2011, s. 25 – 32.
- Locatelli, B.: Ecosystem Services and Climate Change. In: Potchin, M. et al. (eds.): Routledge Handbook of Ecosystem Services. London, New York: Routledge, 2016, p. 481 – 490.
- Matthews, S. N., Iverson, L. R., Peters, M. P., Prasad, A. M., Subburayalu, S.: Assessing and Comparing Risk to Climate Changes among Forested Locations: Implications for Ecosystem Services. *Landscape Ecology*, 2014, 29, 2, p. 213 – 228.
- Mindaš, J., Škvarenina, J. (eds.): Lesy Slovenska a globálne klimatické zmeny. Zvolen: EFRA – Vedecká agentúra pre ekológiu a lesníctvo, Lesnícky výskumný ústav Zvolen, 2003, 129 s.
- Mindaš, J., Škvarenina, J., Škvareninová, J.: Biodiversity and Climate Change: Consequences for Norway Spruce Mountain Forests in Slovakia. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 2016, 10, 5, p. 508 – 512.
- Mindaš, J., Škvareninová, J.: Biodiversity and Climate Change: Consequences for Upper Tree Line in Slovakia. *Lesnícky časopis – Forestry Journal*, 2016, 62, 3, p. 181 – 185.
- Perrings, C.: Biodiversity, Ecosystem Services, and Climate Change: The Economic Problem. Environmental Department of the World Bank, Environmental Economics Series, 2010, 120, p. 1 – 40.
- Shannon, C. E.: A Mathematical Theory of Communication. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27, p. 379 – 423, p. 623 – 656.
- Shugart, H. H., Sedjo, R. A., Sohngen, B. L.: Forests & Global Climate Change: Potential Impacts on U. S. Forest Resources. Pew Center on Global Climate Change. 2003. (<https://www.c2es.org/docUploads/forestry.pdf>)
- Škvarenina, J., Szolgay, J., Šiška, B., Lapin, M.: Klimatická zmena a krajina: dopady klimatickej zmeny a zhodnotenie zraniteľnosti územia na Slovensku v sektoroch vodné hospodárstvo, lesy a poľnohospodárstvo. Štúdia Slovenskej bioklimatologickej spoločnosti SAV XXV. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2010, 114 s.
- Thywissen, K.: Components of Risk – A Comparative Glossary. Bonn: Publication Series of UNU Institute for Environment and Human Security, 2006, 48 p.
- Vladovič, J.: Oblastné východiská a princípy hodnotenia drevinového zloženia a ekologickej stability lesov Slovenska. Lesnícke štúdie č. 57. Bratislava: Príroda, 2003, 160 s.

doc. Ing. RNDr. Jozef Mindaš, PhD., j.mindas@sevs.sk
Ústav ekológie a environmentálnych vied Stredoeurópskej vysokej školy v Skalici, Kráľovská 386/11,
909 01 Skalica

prof. Ing. Ján Holécý, CSc., holecy@tuzvo.sk
Katedra ekonomiky a riadenia lesného hospodárstva
Lesníckej fakulty Technickej univerzity vo Zvolene,
Masarykova 24, 960 53 Zvolen

prof. Ing. Jaroslav Škvarenina, CSc., skvarenina@tuzvo.sk
Katedra prírodného prostredia Lesníckej fakulty
Technickej univerzity vo Zvolene, Masarykova 24, 960 53
Zvolen