

Az éghajlatváltozás hatásai a természetes élővilágra és teendőink a megőrzés és kutatás területén*

Kovács-Láng Edit, Kröel-Dulay György és Czúcz Bálint

MTA Ökológiai és Botanikai Kutatóintézete, 2163 Vácrátót, E-mail: lange@botanika.hu

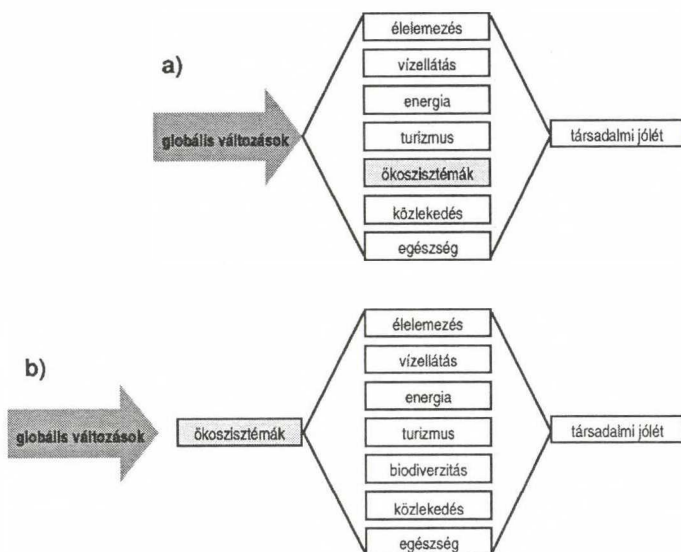
Összefoglaló: Az itt bemutatott tanulmány eredetileg 2006-ban a Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia természetvédelmi háttér tanulmányaként készült, mely áttekinti mindazokat a problémákat, melyekkel a hazai természetvédelemnek az éghajlatváltozás következtében mindenképpen szembe kell néznie. A tanulmány felvázolja a természetes ökológiai rendszerek előrejelzésének nehézségeit, illetve az élővilágnak a klímaváltozás során várhatóan érintett toleranciasajátságait. Áttekintést ad az eddig megfigyelt, előre jelzett, vagy kísérletek során tapasztalt ökológiai változásokról, kiemelve a magyarországi tapasztalatokat. A vitaindítónak szánt tanulmány legfőbb üzenete azonban a hazai természetvédelem előtt álló (részben belső, részben szektorokon átvívelő) sürgős teendők részletes áttekintése, valamint javaslatok tétele a közeljövő legfontosabb cselekvési, szervezési és kutatási feladataira vonatkozóan.

Kulcsszavak: klímaváltozás, természetvédelem, adaptáció, ökoszisztémák

Bevezetés

A globális klímaváltozást számos meteorológiai kutatás igazolja már, ezek közül legfrissebb az IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, Éghajlatváltozási Kormányközi Bizottság) negyedik összefoglaló jelentése (AR4, IPCC 2007). A Föld klímája kb. 0,6 °C-ot melegedett az elmúlt 100 évben, ennek a hatása már látszik, és a XXI. századra 2–4 °C-os emelkedés várható. A klímaváltozás érinti gazdasági és társadalmi életünk minden szektorát, és hatással van a természetes ökológiai rendszerekre is. Ma már felismert és elfogadott tény, hogy gazdasági és társadalmi életünk az egyébként korlátos természeti erőforrásokra támaszkodik és az ökoszisztémák legkülönbözőbb hasznait élvezi (ökoszisztéma szolgáltatások, MEA 2005). Ez a felismerés tükröződik abban a szemléletmódban, amely szerint a természetes élővilág védelme nem egyszerűen egy szektor a többi közül, hanem az ökoszisztéma szolgáltatások révén a legtöbb szektorra hatással vannak, és a globális változások elsősorban az ökoszisztéma szolgáltatások megváltozásán keresztül befolyásolják mindennapi életünket (1. ábra). A Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia egyik nagy érdeme, hogy felismerve a természetes élővilág és az ökoszisztéma szolgáltatások alapvető jelentőségét, kiemelten foglalkozik az éghajlatváltozás várható ökológiai következményeivel.

* A cikk szakmai háttéranyag, amely nem lett lektorálva, de fontossága miatt szerkesztett formában a Természetvédelmi Közlemények leközli.



1. ábra. Az ökoszisztémák szerepe a globális változásoknak a társadalmi jólétre gyakorolt hatásában. a) hagyományos nézet (IPCC 2001), b) az „ökoszisztéma szolgáltatások” koncepciójának figyelembevételével kialakított nézet. (forrás: Schröter 2005)

A természetvédelem, mint speciális szektor, és a természetes ökoszisztémák, mint speciális objektumok

Fő tevékenységének sajátos megőrző jellegéből következően a természetvédelem, mint szektor számos tekintetben különbözik a további szektoroktól az éghajlatváltozás problematikájának vonatkozásában. A többi szektor (pl. mezőgazdaság, egészségügy, katasztrófavédelem, közlekedés) aktív emberi tevékenységet takar, amely, még ha nem is független a környezeti adottságoktól, így a klímától, de a megváltozó környezeti feltételek között módosítható. Ehhez képest a természetvédelem, mint szektor, eredendően „passzív”: a stabilitás (vagy a természetes változatosság, természetes folyamatok) fenntartása, megőrzése a célja („konzerváció”), és ha aktív is, akkor a változatlanságot vagy természetes folyamatokat veszélyeztető tevékenység elhárításán dolgozik. Ennek a passzivitásnak negatív a kicsengése, de valójában pozitív tartalmat takar, célja a természetes ökológiai rendszerek önfenntartó, önszabályozó képességének megőrzése.

A természetes ökoszisztémák önfenntartó, önszabályozó képességéből következik, hogy autonóm adaptációra képesek. Emellett a természetes ökoszisztémák már ki voltak téve klímaváltozásnak. A földi klíma a földtörténet során természetes okok miatt jelentős változásokat mutatott, amelyekre az aktuális élővilág – a fossziliák tanúsága szerint – kisebb nagyobb változásokkal, elvándorlásokkal, esetenként tömeges kihalással reagált. Ez azt jelenti, hogy ha a klíma megváltozása (ennek

mértéke és sebessége) a természeteshez hasonló lenne (és összefüggő természeti tájborítaná a Földet), ez nem okozna gondot; de sajnos nem ez a helyzet. Emellett a természetes rendszerek az ember által alkotott rendszerekhez képest bonyolultabbak, több komponensűek, és nem eléggé ismertek. Mai formájukat a legváltozatosabb idő és térléptékű folyamatok nyomán nyerték el. Válaszreakcióik is különböző idő-skálájúak lehetnek, egyesek csak jelentős késleltetéssel válnak detektálhatóvá. Ezek a tulajdonságok jelentősen megnehezítik az előrejelzést. Ennek ellenére az autonóm adaptációval számolni kell, segíteni kell, és az esetleges beavatkozásokat erre rásegítve kell megtervezni.

A vizsgált rendszerek komplexitásának köszönhetően a természetvédelem esetében a klasszikus közgazdasági szemléletű értékelés nem megoldható. Szerencsére ma már nem ott tartunk, hogy a természetes ökoszisztémák védelme pusztán esztétikai okokból történne, vagy, mert ez erkölcsi kötelességünk. Mint azt már a bevezetőben is említettük, ma már széles körben felismert és elfogadott tény, hogy gazdasági és társadalmi életünk az ökológiai rendszerek különféle szolgáltatásait élvezzi, anélkül hogy ezt pénzben kifejezné. Noha vannak próbálkozások ezeknek, a hasznvételeknek a pénzbeli számszerűsítésére (Costanza *et al.* 1997), az éghajlatváltozás okozta károk és veszteségek vagy egy-egy adaptációs/mitigációs beavatkozás hasznának precíz kalkulációja sokkal kevésbé végezhető el a természetvédelem esetében, mint ahogy az sok más szektor esetében megoldható.

Egy további probléma, hogy a természetvédelem eredménye és sikeressége nagyban függ más szektorok tevékenységétől (vízgazdálkodás, erdészet, mezőgazdaság). Ez már ma is így van, amikor a rezervátumokba szorított természetes ökoszisztémákra jelentős hatással van a körülöttük levő mátrixban folyó tevékenység. Egy jelentős klímaváltozás esetén, amikor a közösségek szétzilálódnak, a fajoknak vándorolniuk kellene, és új közösségek szerveződnek (nagy eséllyel a kultúrtájuk nyomasztó fölányban levő inváziós és gyomfajainak részvételével vagy dominanciájával) ez még inkább így lesz. Az, hogy a védett területeket körülvevő mátrixban mi történik, lehet, hogy fontosabb lesz, mint, hogy a védett területeken mi történik. A vízgazdálkodás, mint szakterület, elsősorban a jelenlegi értékek megőrzésében segíthet (tompíthatja a melegedés és szárazodás hatásait), míg a természeteshez közelálló erdő- és agrárgazdálkodás a bekövetkező változások esetén segítheti, hogy a változások a természeteshez hasonló mederben folyjanak (már amennyire ez lehetséges).

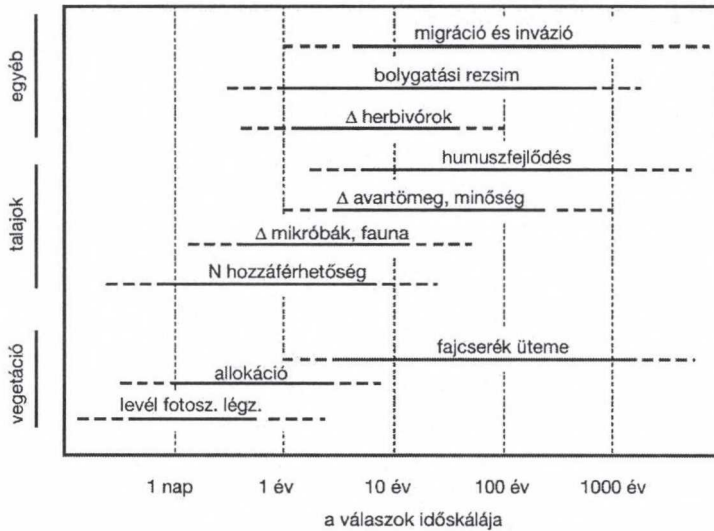
Mint tehát az eddigiekből is látható az alkalmazkodás lehetőségei a természetvédelemben meglehetősen korlátozottak. Amíg a megváltozott klímában egy mezőgazdász vagy erdész ültethet más növényt, egy útépítő építhet utat más technológiával, légkondicionálhatjuk a házakat és utazhatunk légkondicionált autóval és villamossal, addig egy nemzeti park nem tudja lecserélni a lombhullató tölgyeseit örökzöldekre, vagy a pusztáit sivatagokra. Egy ideig lehet cél az elszegényedő ökoszisztémák védelme az inváziókkal szemben, de egy határon túl (jelentős mértékű klímaváltozás esetén) a természetes ökoszisztémák – mai formájukban, a mai helyükön –

nem fognak túlélni. Néhány foknál nagyobb felmelegedés esetén olyan mértékben tolódnak el a bioszféra övezetei, hogy elképzelhető, hogy egy, a jelenlegi társulásokat az eredeti helyükön megőrizni akaró konzervációs gyakorlatilag eleve vesztesre lesz ítélve. Egy ilyen helyzetből lehet, hogy azok fognak jobban kijönni, akik idejekorán felméri a helyzetet és az „in situ” konzerváció mellett más, újabb alternatív restaurációs vagy transzlokációs eszközökkel előre felkészülnek egy ilyen eshetőségre. Ez utóbbi lehetőség, bár elsősorban idegen a jelenleg uralkodó konzervációs szemlélettől, az elmúlt években egyre jelentősebb fórumokon merül fel újra és újra (Hoegh-Guldberg *et al.* 2008, Hunter 2007, McLachlan *et al.* 2007). Ezt a mérnöki jellegű, a „természetes” ökoszisztémák tervezését és kivitelezését jelentő tevékenységet azonban már nem természetvédelemnek fogják hívni (talán inkább „eco-engineering”), és esélye a sikerre a megfelelő tudás hiányában egyelőre minimális. Ennek megfelelően az éghajlatváltozás kezdeti időszakában, feltehetőleg még az autonóm adaptációé lesz a főszerep, és a természetvédelem tervezett adaptációs tevékenysége is elsősorban az autonóm adaptáció lehetőségeinek biztosítására kell, hogy irányuljon. A későbbiek folyamán, amennyiben egy jelentős (több fokos) melegedés következik be (ami egyre valószínűbb), akkor a természetvédelemben elkerülhetetlenül paradigmaváltásra lesz szükség. Egy ilyen világban a megőrzésre való törekvés mellett, a változás (vándorlás, fajok kihalása és újak megtelepedése) elfogadása, sőt, segítése, és minél inkább természetes mederben tartása lesz a legfontosabb feladat.

Az előrejelzés bizonytalanságának forrásai a természetes ökoszisztémák esetében

A jelenségek értelmezésében a fő problémát az jelenti, hogy a globális környezeti változások komponensei közül nehéz a direkt klimatikus hatást kiszűrni, azonosítani, ezt ugyanis az egyéb közvetlen és közvetett antropogén hatások – elsősorban a tájhasználat módja – erősen befolyásolják. A ható tényezők kombinációja, szünergizmusa az élővilágra és az ökológiai rendszerekre sokkal drasztikusabb hatást gyakorolhat, mint azt az egyes tényezők külön-külön tennék (Schneider & Root 2001).

Komoly további problémát jelentenek a klíma jelenségeinek és az ökológiai jelenségeknek, folyamatoknak és ezek megismerését célzó vizsgálatoknak léptékbeli különbségei. Bizonyos ökológiai jelenségek skálája, mint például a növényzeti formációk által meghatározott biotopok övezetessége, vagy egyes fajok elterjedési határai, hagyományosan jól illeszthetők a klimatikus jelenségek skálájához, azonban a folyamatok és mechanizmusok megismerését célzó, esetenként kísérletes ökológiai vizsgálatok általában finomabb skálájúak. Az eredmények kiterjesztése, a magasabb szerveződési szinteken történő értelmezése a hierarchikusan szervezett ökológiai rendszerek emergens tulajdonságai miatt komoly nehézségekbe ütközik (Bazzaz 1998). A különböző léptékű ökológiai folyamatok eltérő időskálájú válaszai igen eltérő ökoszisztéma válaszokban összegeződhetnek rövid, illetve hosszú távon (2. ábra).



2. ábra. Az ökoszisztéma folyamatok és komponensek klímaváltozásra adott reakcióinak időskálája (Shaver *et al.* 2000 nyomán).

Az élővilág várható további viselkedésére vonatkozó projekciók nehézségeinek alapvető forrása az ökológiai rendszerek működésének mindaddig nem kellő ismerete. Előre látható és ma még nem triviális, előre nem látható veszélyekkel egyaránt kell számolnunk. Az ökológiai válaszok gyakran (általában) nem lineárisak, a környezeti változások kiváltotta reakciók additívak, gyakran bizonyos küszöbérték elérésénél hirtelen fellépő nagy változásokban jelentkeznek. Az ökoszisztémák koordináltságában beálló esetleges változások valószínűsége, mértéke és iránya nehezen jósolható. Nem tudható például, hogy egy természetes, vagy esetleg gyomfaj mikor válik inváziós, károsító özöngyommá, egy rovarfaj tömegesen pusztító kártevővé.

További problémát jelent az a tény, hogy az ökológiai folyamatok sebessége nincs szinkronban a jelen klimatikus változások sebességével. Az emelkedő hőmérséklet, esetenként fokozódó vízhiány hatását a növények fiziológiai plaszticitása csak relatíve szűk korlátok között tudja tolerálni, a populációkban a természetes szelekción alapuló adaptáltság kialakulására azonban nincs idő! Az eredmény számos populáció kihalása vagy elvándorlása lehet.

A természetes élővilág menekülési útja azonban erősen korlátozva van! Természetes barriert jelentenek a vándorlás útjában a NY–K irányú hegyláncok, vagy tengerek. Eltekintve attól a tényről, hogy a legtöbb növényfaj, különösen pl. a fák természetes vándorlási sebessége a jelen változások mértékéhez képest jóval kisebb, a populációk vándorlását gyakorlatilag meggátolja a természetes tájak ember által történt feldarabolása, a természetes élőhelyek megszüntetése, minimális foltokká való zsugorítása (Schneider & Root 2001).

Az élővilágra jellemző érzékenységek

Az éghajlatváltozás nyilvánvalóan igen kiterjedt és mélyreható változásokat fog okozni a globális ökológiai rendszerben. Az éghajlat hatással van a fajok fitneszére, elterjedésére és tömegességére, a populációk dinamikájára, az ökoszisztémák szerkezetére és működésére is. A várhatóan bekövetkező változások a következő módon csoportosíthatók (Hughes 2000 alapján, módosítva):

Fiziológiai: A megváltozott külső körülmények (CO₂ koncentráció, hőmérséklet, sugárzásviszonyok, szárazodás) közvetlen hatással vannak a fajok életfolyamataira. Így az éghajlatváltozás következtében változások várhatók az egyes egyedek növekedésében, testfelépítésében, szöveteiben, biológiai produktivitásába.

Fenológiai: Határozott szezonálitással rendelkező területeken az élőlények többsége életszakaszait a környezet legfontosabb eseményeihez, az évszakok változásához időzíti. Az időzítés fajonként különböző, evolúciósan optimalizált küszöbértékek (pl. hőösszegek) segítségével történik. Az éghajlat módosulása a küszöbértékek, és ezen keresztül a populációk életmenetének megváltozásával jár.

Fajok elterjedése: Régóta ismert, hogy egyes fajok elterjedése szoros kapcsolatban áll valamilyen éghajlati paraméter szélső értékeivel: ilyenek pl. a hőmérséklet, a hótakaró vagy a bozóttüzek szintén éghajlat által meghatározott gyakorisága (pl. Grace 1987, Salisbury 1926, Woodward 1988). A ma világszerte elterjedten használt leíró jellegű éghajlat-osztályozási rendszerek (Köppen és Trewartha éghajlat-osztályozásai) is tulajdonképpen a növényzet (és a talaj) éghajlatjelző tulajdonságán alapulnak. Az éghajlati viszonyok gyors megváltozásával az egyes fajok és a belőlük formálódó közösségek földrajzi elterjedését földtörténeti korok óta szabályozó egyensúly általános megbomlása várható. Erre az egyensúlyvesztésre a fajok várhatóan csak korlátozott mértékben tudnak vándorlással reagálni, így a fajok elterjedésének változásai a kihalási és az inváziós folyamatok felgyorsulásával járnak együtt.

Ökológiai stabilitás: Az egyes fajok közötti kompetíció, táplálkozáshálózati (trofikus) és szukcessziós viszonyok átrendeződése következtében a természetes és a természetközeli közösségek ökológiai stabilitásának, önfenntartó-képességének soha nem látott mértékű meggyengülése várható. Azok a fajok, melyek a környezeti feltételek egy-egy jól meghatározott kombinációjához alkalmazkodtak, egyáltalán nem biztos, hogy meg tudják majd találni azokat az új élőhelyeket, ahol ezek a feltételek az éghajlatváltozás következtében kialakulnak. A meghatározott körülményekre specializálódott fajok többsége az emberi tevékenység miatt számára átjárhatatlanná vált tájban ma már teljesen el van szigetelve, és vélhetően az éghajlatváltozás hatására ki fog pusztulni élőhelyeinek többségéről. Ez a folyamat generalista fajok által uralt elszegényedett, sérülékeny társulásokat eredményez, és így további fajok inváziója előtt nyitja meg az utat (Lövei 1997, Tilman 1993). A helyzetet tovább súlyosbítja, hogy az átmenetek nem feltétlenül fokozatosak lesznek: a fokozatosan változó klímában sérülékenyebbé váló ökoszisztémák extrém időjárás

események, vagy bolygatások (aszály, tüzek, új kártevők tömeges megjelenése) hatására hirtelen omolhatnak össze, és helyükön már az új, kevésbé stabil, de a megváltozott körülményekhez jobban alkalmazkodott új közösségek fognak megjelenni.

Genetikai adaptáció: Egyes gyors nemzedékváltással és nagy szaporodási rátával jellemezhető szexuálisan szaporodó fajok elvileg gyors mikroevolúciós fejlődéssel *in situ* is képesek lehetnek alkalmazkodni a megváltozott körülményekhez. Erre a folyamatra azonban egyelőre még nem figyeltek meg példát (Hughes 2000). Ez az alkalmazkodási mód várhatóan nem lesz általánosan jellemző, a fajok többsége valószínűleg csak elvándorlással tud reagálni az éghajlatváltozás eseményeire. Ez a jelenség nagyságrendekkel hosszabb időskálán működik csak, mint akár az eddig említett többi érzékenység, akár a Nemzeti Éghajlat-változási Stratégia jellemző időskálája.

Az éghajlatváltozás élő környezetre gyakorolt hatásai közül hosszú távon várhatóan az ökológiai stabilitás elvesztése lesz a legjelentősebb. Fontos megjegyezni, hogy az eddigi adatok szerint a felmelegedés mértéke és a kiváltott hatások nagy területi különbségeket mutatnak, a sarkok felé jóval erőteljesebbek.

A várható klimatikus hatások

A klímaváltozás az egész Kárpát medencében, így Magyarországon is a melegedés és szárazodás irányába való, máris folyamatban lévő elmozdulást jelent. A legújabb éghajlati projekciók (Bartholy *et al.* 2007) szerint 2050-re mindkét, az Éghajlat-változási Stratégiában szereplő scenárió (A2, B2 – IPCC 2001, 2007) szerint ~2,3 °C-os éves középhőmérséklet emelkedésre és a csapadék éven belüli 13–15%-os átrendeződésére kell számítani (szárazabb nyarak és csapadékosabb telek). A változások iránya hasonló lesz már 2025-ben is, csak a mértéke lesz kisebb (1,3 °C és 8% az A2 forgatókönyv és 1,5 °C és 9–10% a B2 scenárió esetén). Az ökológiai hatások előrejelzésének bizonytalanságai miatt, az A2 és B2 scenárió közötti árnyalatnyi különbségek (legalábbis 2050-ig) értelmetlenné teszi, hogy A2 és B2 előrejelzést különböztessünk meg. Meg kell továbbá jegyezni, hogy a jelenleg rendelkezésre álló éghajlati scenáriók térbeli, időbeli de főleg tematikus felbontása csak korlátozottan alkalmas ökológiai projekciók készítésére, mert ökológiai szempontból fontosabbak lehetnek a nehezen előre jelezhető szélsőséges események (aszály, hóhullámok, korai és kései fagyok), mint a klimatikus átlagok.

Jelenlegi ismereteink szerint a következő (egymástól nem független) éghajlati hatások megkülönböztetése indokolt a természetvédelem számára:

- általános melegedés (pl. éves középhőmérséklet emelkedése, tenyészidőszak hossza...)
- a telek enyhülése (téli középhőmérséklet, téli abszolút minimumok)
- szárazodás, aszályosodás (nyári középhőmérséklet emelkedése, tenyészidőszak csapadékának csökkenése, csapadék nélküli időszak hossza)
- az éves csapadékeloszlás, a hótakaró és a téli csapadék változásai

A természetes élővilág sérülékenysége, a várható veszteségek

Az említett jellemző érzékenységekből kifolyólag, az éghajlatváltozás előbbiekben felsorolt hatásainak következtében a természetes rendszerek számos világos és egyértelmű veszteséget fognak elszenvedni. A legfontosabb károk – a genetikai diverzitás csökkenése, a fajkihalások, vagy az ökoszisztéma szolgáltatások sérülései – igen nehezen becsülhető mértékű, de mindenképpen súlyos kockázatot jelentenek a társadalom számára. Mivel az egyes veszteségek igen nehezen forintosíthatók, így konkrét *károkról* a továbbiakban nem lesz szó, csak a sérülékenységekről és a várható veszteségekről szóló nemzetközi és hazai tapasztalatokat gyűjtöttük össze a következő oldalakon.

Az éghajlatváltozás természetvédelmi hatásai esetében *pozitív hatásokról* általában nem beszélhetünk. A természetvédelem elsődleges célja a természeti környezetnek az ember és a társadalom számára nyújtott szolgáltatásainak hosszú távú megőrzése, fenntartása, melyet a természeti értékek megóvásával, konzerválásával igyekszik megvalósítani. Ebben a hagyományos világképben a meglévő természeti értékekben bekövetkező minden változás többé-kevésbé káros. Ily módon definíció szerint nem lehet eredendően pozitív következménye semmilyen nagyságú tájátalakulásnak. Ami más szektorok számára előnyös is lehet (pl. a vegetációs periódus meghosszabbodása a mezőgazdaság számára), itt az is károsnak tekintendő, hiszen a természetes ökológiai viszonyok felborulása irányába fejt ki hatását, mert a változások sebessége jelentősen nagyobb, mint a korábbi természetes változásoké.

A jobb áttekinthetőség érdekében a továbbiakban nemzetközi, majd hazai vonatkozásban foglaljuk össze a sérülékenységről és veszteségekről szóló ismereteket. Ezeknek az ismereteknek három fő forrásuk van: megfigyelési tapasztalatok, kísérleti eredmények és modellezett előrejelzések. A továbbiakban ennek megfelelően rendszerezve mutatjuk be az éghajlatváltozásnak a természetvédelmi szektort érintő legfontosabb következményeit.

Nemzetközi tapasztalatok

Megfigyelt változások

Bár az éghajlatváltozás ökológiai hatásainak kimutatása számos buktatót rejtő nem triviális feladat, a várható változásoknak már ma is számos jelét figyelték meg. Az ökológiai irodalom máris igen gazdag azon jelenségek és változások leírásában, amelyek az utóbbi évtizedekben tapasztalhatók és elsősorban a klímaváltozás hatásával magyarázhatók. Ennek ellenére nagyon körültekintőnek kell lenni a különböző megfigyelések és jelek értelmezésében, mert

- a tudományos szakirodalom természetéből adódóan a pozitív korrelációt mutató trendek sokkal könnyebben kerülnek publikálásra, mint a negatív, vagy a következtetlen trendek,

- a globális változás különböző összetevői (éghajlatváltozás, tájhasználat-változás, légszennyezés...) mind-mind egyszerre jelentkeznek, és az együttes hatásból nem mindig egyértelmű, hogy mi az, ami közvetlenül vagy közvetve az éghajlatváltozás számlájára írható.

Fiziológiai változások

Az éghajlatváltozás valamint az azt előidéző megemelkedett CO₂ koncentráció egyik következménye, hogy a növényzet könnyebben tudja felvenni a szén-dioxidot a légkörből. Ez többlet tápanyagforrásként jelentkezik, hiszen a fotoszintézis folyamatát, valamint a növények vízgazdálkodását is hatékonyabbá teszi (kevesebbet kell nyitva tartani a gázcserenyílásokat, sőt akár kevesebb gázcserenyílás is elég). Ezekre a folyamatokra több empirikus bizonyíték is megfigyelhető. A fokozott produkció műholdakról nézve egyes régiókban mint zöldülési trend válik szembetűnővé (Myneni *et al.* 1997, Zhou *et al.* 2001), de igazolják ezt mind az északi, mind a déli félgömbön végzett évgyűrűvizsgálatok is (Briffa *et al.* 1998). Ezzel összhangban több erdészeti megfigyelés is az erdők gyorsabb növekedéséről számol be (Cannell *et al.* 1998, Phillips *et al.* 1998). Élő növényegyedek, és ugyanarról a vidékről begyűjtött herbáriumi példányok összehasonlításával megállapítható volt, hogy a növények sztómasűrűsége is szignifikáns csökkenést mutatott az elmúlt 200 év folyamán a szárazsághoz való alkalmazkodást jelezve. (Beerling & Kelly 1997).

Fenológiai változások

Sok élőlény életciklusa olyan évszakosan változó szignáloktól függ, mint a hőmérséklet, a nappalok hosszának alakulása. A klíma változása ezeket is befolyásolja. Leggyakrabban regisztrálható a fenológiai események tavaszi előretolódása (korábbi virágzás, rovarok korábbi rajzása, madarak korábbi tojásrakása és költése) átlagosan évtizedenként 2,3 nap (Walther *et al.* 2002). Ebben azonban jelentős regionális különbségek lehetnek. Európai fenológiai megfigyelések a vegetációs szezon 11 nappal történt meghosszabbodását igazolták az utóbbi 30 év során, amely a magasabb átlaghőmérsékletek eredménye.

Menzel, Scheifinger, Ahas és munkatársaik (Ahas *et al.* 2002, Menzel 2000, Menzel & Fabian 1999, Menzel *et al.* 2003, Scheifinger *et al.* 2002) több évtizedre kiterjedő európai éghajlati és klimatológiai adatsorok alapján kimutatták, hogy a tavaszi fenológiai események, mint például a rügyfakadás egyre korábbra kerülnek (0,1–0,3 nap/év sebességgel), az őszié, mint pl. a lombhullás, pedig évről évre később következnek be (0,1–0,2 nap/év). Ennek következtében a fák növekedési időszaka évente átlagosan 0,22 nappal hosszabbodik, ami a megemelkedett CO₂ szint mellett szintén hozzájárul a növények nagyobb produkciójához. Parmesan & Yohe (2003) 677 faj egyedfejlődési ciklusainak elemzése során az esetek 82%-ban találta meghatározónak a klímaváltozás hatását.

A fajok elterjedésének változásai

Általános jelenség számos faj sarkok felé ill. a hegységekben magasabb régiók felé történő vándorlása. Ezt angliai, Finnországbeli és egyéb, főleg skandináv adatok (ahol nagyterjedésű É–D irányú transzektek mentén vizsgálható) számos madár, hal, szitakötő és egyéb rovarfajra vonatkozóan bizonyítják (Hickling *et al.* 2005, Lehto 2003, Parmesan 1996, Parmesan *et al.* 1999, Thomas & Lennon 1999, Walther *et al.* 2002). Parmesan & Yohe (2003) több mint ezer faj elterjedési adatainak elemzése során az esetek 43%-ban találta meghatározónak a klímaváltozás hatását.

A fajok éghajlatváltozás hatására történő vándorlása a mai antropogén környezetben meglehetősen korlátozott lesz. Főleg olyan, az ember által még kevésbé átalakított rendszerekben van csak remény a vándorlási folyamatok más antropogén tényezőktől elválasztott megragadására és dokumentálására, ahol számottevő éghajlati gradiens húzódik és még ma is a természetes ökológiai folyamatok (szukcesszió, anyagkörforgalom...) a meghatározók. Ilyen hely a Földön ma már csak kevés van, elsősorban a sarkvidékek és a magashegységek, valamint talán a félsivatagok különböző, viszonylag érintetlen régiói tartoznak ide. Ezt jelzi azoknak a helyeknek a (nem teljes) felsorolása is, ahol már kimutathatták növényfajoknak az éghajlatváltozás hatására történő vándorlását: Alaszka (Sturm *et al.* 2001), Antarktisz (Smith 1994), Sziklás-hegység (Peterson 1994), Andok (Cuevas 2002), Skandináv-hegység (Kullman 2001, 2002). Emellett feltétlenül figyelmet érdemel az is, hogy olykor viszonylag kis éghajlati hatások is döntően átalakíthatják az adott hely élővilágát, például a tüzek gyakoriságának megváltoztatásával (Miller & Urban 1999, Swetnam 1993).

Társulások és táplálékhálózatok átrendeződése

20 éves komplex ökológiai és párhuzamos klimatikus adatsorok részletes elemzésével (Voigt *et al.* 2003) gyeptársulások növényi (primer producens) és állati komponenseinek (herbivórok, ragadozók) klímaérzékenységét vizsgálva kimutatták, hogy a trofikus szintek eltérő táplálkozási csoportjai eltérő klímaérzékenységgel rendelkeznek. Az érzékenység a felsőbb trofikus szintek felé növekedett. Ez az eltérő érzékenység a klímaváltozás során a biocönózis destabilizálódásához vezet (Watt & McFarlane 2002). Ezt a projekcióknál figyelembe kell venni.

A klímaváltozással járó fokozódó szárazság gátolhatja a természetes sukceszió, például beerdősülés folyamatát, ahogyan ezt egy hosszú távú ökológiai terepkísérletben tapasztalták Spanyolországban a macchia regenerációját szárazságs- és hőkezelés hatása alatt vizsgálva (Penuelas *et al.* 2007).

A csökkenő mennyiségű csapadék állományszerkezetre gyakorolt hatását mutatták ki az amerikai prérin is. Egy csapadékgradiens mentén a csökkenő csapadék mennyiséggel a gyeppálmány magassága, az asszimiláló felület nagysága, a földfeletti kompetíció csökkent, míg a vízhiány fokozódásával a gyökérkompetíció növekedett (Lane *et al.* 2000).

Kísérleti eredmények

A téma jellegéből adódóan igen nehéz, komplikált feladat az éghajlatváltozás témakörében kontrollált kísérleteket végrehajtani. A meglévő kísérleti eredmények elsősorban a fiziológiai, fenológiai valamint az ökoszisztémák stabilitására és anyagmérlegére vonatkozó kérdéseket vizsgálják.

A klímaváltozásnak a társulások szerkezetére és dinamikájára gyakorolt hatása függ a társulás szervezethez mértékétől. Angliában 5 éves klímaszimulációs kísérlet (melegítés és csapadékizálás) során kimutatták, hogy a közel természetes, nem bolygatott mészkőgyep fajösszetétele, biomasszája és biodiverzitása kevésbé változott, míg a korábban művelt és felhagyott instabil állapotú gypállományban a kezelés jelentős kompozíciós és szerkezeti változásokat okozott a kontrollhoz képest (Grime *et al.* 2000).

Ugyancsak angliai hosszú távú ökológiai kísérlet igazolta (Morecroft *et al.* 2004) a csapadéknak a gypedinamikában és szukcesszióban betöltött szerepét. Növelve a nyári szárazság gyakoriságát, a fitomassza produkció csökkent, ezt a téli csapadék nem tudta kompenzálni, és a rövid tenyészidejű egyévesek felszaporodtak.

Előrejelzett változások

Modellezett előrejelzések

A várható ökológiai következmények feltárásának igen fontos eszközei a bioklimatikus modellek, melyek lehetőséget teremtenek az egyes fajok / fajcsoportok elterjedése, valamint az éghajlati igényeik közötti kapcsolatok feltárására, számszerűsítésére. E modellek segítségével mód nyílik a fajok várható (lehetséges jövőbeni) elterjedésének a becslésére a különböző éghajlati forgatókönyvek mellett („tér-idő megfeleltetés”). Jóllehet az elkészült projekciók nagy változatosságot mutatnak, és a modellek pedig a pontos jövőbeni adatok nélkül csak korlátozottan validálhatók (Araujo *et al.* 2005), az ökológiai rendszerek várható jövőbeni változásainak becslésére máig is ez jelenti a legelterjedtebben használt módszert. Az eredmények bizonytalanságaihoz nagyban hozzájárulnak a lokális klímaváltozás projekciójának bizonytalanságai is. A bizonytalanságok többsége azonban megfelelő óvatossággal végzett interpretációval jelentősen mérsékelhető (Araujo & Rahbek 2006).

Gyakran készülnek előrejelzések egyes fajok, vagy egész biotopok várható elterjedésére nézve, viszont az ökoszisztémák a jövőbeni szerkezete, működése és stabilitása már sokkal nehezebben modellezhető. A jelenlegi előrejelzések egyik leggyengébb pontja az éghajlat fajok elterjedésére gyakorolt limitáló hatásának nem kellő mélységű ismerete. Egy-egy faj elterjedési határait általában az éghajlati változók szélsőségei jelölik ki (nem pedig az átlagértékek változásai). Az elterjedés északi/felső határán általában az abszolút minimum hőmérsékleteknek, a déli/alsó határon általában az (egy bizonyos küszöbértéket meghaladó erősségű/gyakoriságú) aszálynak, vagy valamely ezzel szoros kapcsolatban lévő jelenségnek (pl. tüzek) korlátozó szerepe a meghatározó (Kröel-Dulay *et al.* 2006). A kompetíciós viszonyok által kijelölt finom léptékű elterjedési határok kialakításában is jelentős szerepe van a

klímának, ugyanis a kompetíció versenymérlegét is valahol a környezeti tényezők billentik egyik vagy másik faj javára. Az éghajlati változók átlagértékei leginkább a nettó primer produkciót (NPP) vagyis a produkciós teljesítményt befolyásolják.

Az ökológiai rendszerek átrendeződésével kapcsolatos projekciók minőségén sokat javítana, ha kellő mélységű ismeretekkel rendelkeznek a fajok elterjedését leginkább befolyásoló időjárási szélsőségek éghajlati statisztikáiról (Hallet *et al.* 2004). Sajnos azonban a jelenlegi modellek leginkább csak az éghajlati elemek átlagértékeinek a modellezésében jók.

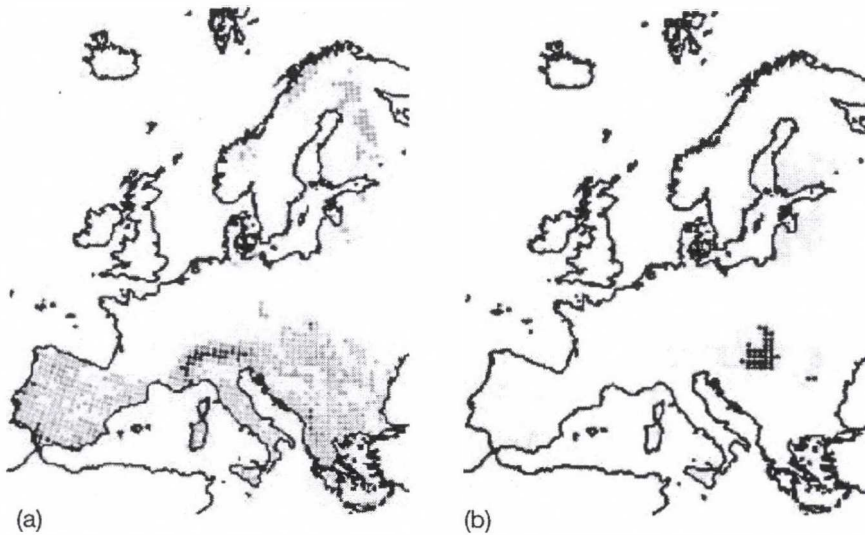
A biomok klímaváltozás hatására történő lehetséges elmozdulásának modellezésében az egyes biomokban domináló növényi életforma (funkcionális típus) ökológiai igényéből indulnak ki. A növényi életformák a globális klimatikus adaptáció eredményeként jöttek létre az evolúció során. Egy bizonyos életforma dominanciája a biom adott klímához való adaptáltságát jelzi, így a biomok elterjedését alapvetően a klimatikus viszonyok szabják meg. A BIOME 3 modell alapján végzett szimulációk az elterjedések várható változásait mutatják (Sykes & Haxeltine 2001). Az elterjedések északi határán kimutatható az abszolút minimum hőmérséklet korlátozó szerepe.

A globális klímamodellek továbbfejlesztésének, valamint az élő környezetre vonatkozó éghajlati hatáskutatásnak várhatóan egyik legfontosabb kutatási területe a jövőben a szélsőségek éghajlati előrejelzésének továbbfejlesztése lesz.

A következőkben néhány jelentősebb irodalmi hivatkozás segítségével összefoglaljuk, hogy mi az, amit jelenleg tudni lehet a fajok elterjedésének az éghajlatváltozás következtében történő várható megváltozásairól.

Peterson (2003) É Amerikában 26 montán és 19 síkvidéki elterjedéssel rendelkező madárfaj elterjedésének változásait vizsgálta a változó klímamodellek függvényében. A csekély terjedési képességgel rendelkező síkvidéki fajokat a klímaváltozás sokkal erősebben érintheti, amely egyrészt elterjedési területük drasztikus 35%-os csökkenéséből és a számukra megfelelő élőhelyek relatíve gyors áthelyeződéséből (0-400km északra tolódás) következik.

Araujo *et al.* (2004) 1200 európai elterjedésű védett, rezervátumokban élő növényfaj lehetséges viselkedését elemezte 2 extrém terjedési szituáció (minimális és maximális terjedőképesség) és a jelenlegi klimatikus igények figyelembevételével. Megállapításuk, hogy (a) a vizsgált fajok 5%-a számára teljesen megszűnnek a szükséges klimatikus feltételek Európában (tehát kihalásra vannak ítélve); (b) a fajok 2%-a számára a jövőben éghajlatilag alkalmassá váló területek nem mutatnak átfedést a jelenlegi elterjedési területtel (így e fajok fennmaradása is meglehetősen bizonytalan). Az (a) fajok főként Dél-Európában (Alpok) és Skandináviában, a (b) fajok különösen Magyarországon (kiterjedt sík vidék, l. még Peterson 2003), lesznek sokan (lásd 3. ábra). A többi faj (a vizsgált fajok 93%-a) esetében a klimatikusan alkalmassá váló új terület a jelenlegi elterjedési területtel változó mértékű átfedést fog mutatni, ezek fennmaradása tehát az élőhelyeik elhelyezkedésétől és terjedési képességüktől függ.



3. ábra. A leginkább veszélyeztetett fajok Európai elterjedési térképe: (a) azon fajok gyakorisága, amelyek számára várhatóan teljesen eltűnnek az éghajlatilag alkalmas területek Európából, (b) azon fajok gyakorisága, ahol a faj jövőbeli megtelepedésére, fennmaradására alkalmas (sá váló) területek nem mutatnak átfedést a jelenlegi elterjedési területtel (Araujo *et al.* 2004 alapján)

1. táblázat. Várható fajkihalási kockázatok Európában Thomas *et al.* (2004) alapján

Kihalás veszélye (%) különböző mértékű hőmérséklet-emelkedés esetén						
Hőmérséklet emelk. [°C]	Jól terjedő fajok			Nem terjedő fajok		
	0,8–1,7	1,8–2,0	>2	0,8–1,7	1,8–2,0	>2
Madarak	–	–	4–6	–	–	25–38
Növények	3–5	3–6	4–6	9–14	10–16	13–21

Thomas *et al.* (2004) a jövő klímaváltozásainak megfelelő kihalási kockázatokat adnak meg Európában, Dél-Afrikában, Mexikóban és Ausztráliában élő különböző élőlénycsoportokra modellprojekciók alapján a 2050-ig terjedő időszakra a terjedőképesség és 3 melegedési szcenárió figyelembevételével (minimum: 0,8–1,7°C; közepes 1,8–2,0°C; maximum: >2 °C hőmérsékletemelkedés). A vizsgálat előrejelzései szerint Európában is jelentős kihalási kockázatokkal kell számolnunk (1. táblázat).

A kihalás kockázata a felmelegedés erősségével fokozódik. Az élőhelyek pusztulása folytán történő kihalások jelenlegi kockázata egy közepes mértékű klímaváltozás kockázatánál kisebb a szerzők elemzése szerint. Arról nincs információ, hogy milyen időtartamra tehető a kihalások bekövetkezése.

A Millennium Ecosystem Assessment (2005) a négy társadalmi-gazdasági szcenárió esetére mutat be projekciókat a biodiverzitás és az ökoszisztéma szolgáltatások jövőjére nézve. Mind a négy szcenárió esetén a jelzett klímaváltozások az ökoszisztéma szolgáltatások felhasználásának jelentős növekedését, a szolgáltatások degradációját és a biodiverzitás folyamatos csökkenését vetítik előre. Az elemzés szerint a legfontosabb veszélyek:

- számos, főként kis populációkkal bíró fajnál a kihalás kockázatának növekedése,
- az arid és szemi-arid régiókban a víz hozzáférhetőségének csökkenése, minőségének romlása,
- a biomassa produkció hosszú távú csökkenése,
- az évszázad végéig jelzett változások mértéke az utóbbi 10000 évben példa nélküli és a földhasználat változások az inváziós fajok hatásával kombinálva valószínűleg korlátozzák a fajok elvándorlását és a fajok fennmaradását a fragmentált élőhelyeken,
- a természetes ökoszisztémák szénelnyelő hatása nem pontosan ismert és a változások hatására történő reakció is bizonytalan,
- különösen veszélyeztetettek a száraz (dryland) ökoszisztémák (mint pl. hazánkban a Duna-Tisza-közi Homokhátság), ahol folyamatos élőhely-degradáció, biodiverzitás-csökkenés és az ökoszisztéma szolgáltatások csökkenése várható.

Az első, gazdasági szempontokat széleskörűen és globálisan elemző és mérlegelő munka a brit kormány felkérésére készült Stern Review (2006) hangsúlyozza, hogy a klímaváltozás óriási globális kockázatot jelent és ezért sürgős globális választ igényel. A következményeket senki nem tudja bizonyosan, de a kockázatot nagyon jól lehet érzékelni. Főleg gazdasági szempontból elemzi a lehetséges következményeket és a megelőzésükre tehető/teendő mitigációs lépések költségeit. A várható hatásokat a gazdaságra, emberi életre és a környezetre vonatkozóan tekintti át. Elsősorban a melegezés hatásaival foglalkozik, ahol a környezetre vonatkozóan Thomas *et al.* (2004) kockázatbecslésére támaszkodik. Hangsúlyozza, hogy a magasabb hőmérsékletek növelik az esélyét a hirtelen és nagy térléptékű változásoknak. A klímaváltozás várható káros következményei megelőzése céljából történő intézkedések és befektetések költségeit hosszú távon megtérülőnek ítéli.

A vándorlás akadályai

A klimatikus viszonyok változásával a földtörténet során a fajok vagy adaptálódtak, vagy elvándoroltak, vagy kihaltak. Az állatok mozgékonyáguknál fogva könnyebben helyzetben vannak, a növények csak refugiumokban tudtak fennmaradni elszigetelődve. Ezért a kihalás erősebben fenyegeti őket. Ott a legnagyobb a veszély, ahol az élőlények kis területen, izolálva fordulnak elő olyan számukra alkalmatlan élőhelyekbe ágyazva, amelyeken keresztül elvándorolni nem tudnak (nálunk pl. a glaciális reliktumok).

A korábbi földtörténeti korok éghajlatváltozásai során meg lehetett figyelni, hogy az élőlények vándorlása többé-kevésbé lépést tudott tartani az éghajlat meg-

változásával. Az ember természetátalakító tevékenységének következtében azonban a küszöbön álló éghajlatváltozásra mindez már valószínűleg nem lesz igaz, és a fajok mozgásában, lokális eltűnésében és az új fajok megjelenésében az éghajlatváltozás hatása nem igazán választható el az egyéb antropogén hatásoktól. Az éghajlatváltozás hatására kialakuló új globális vegetáció mintázatát kialakító legfontosabb tényező a jövőben várhatóan a fajok terjedési képessége lesz. (Tilman 1993)

Az éves középhőmérséklet 3 °C-os emelkedése a Föld felületén körülbelül 300 km észak-déli, vagy 500 m magassági elmozdulásnak felel meg (Hughes 2000; vö. Hinckley & Tierney 1991). Korábbi éghajlatváltozásokkal összehasonlítva ez egy igen erős változás. A növények vándorlási képessége sajnos kevésbé ismert, paleobotanikai adatok alapján azonban a legtöbb faj vándorlási sebessége évszázadonként 20–200 km közé tehető (Huntley & Birks 1983). Egy globális metaanalízis (hosszú távú, nagy térdimenziójú, sokfajú adatbázisokból dolgozva) kimutatta, hogy a vándorlás átlagos sebessége 6,1 km/évtized (Parmesan & Yohe 2003). Ily módon a várható felmelegedés üteme közel tízszeresen meghaladja a legtöbb faj vándorlási képességét.

A természetes élővilág menekülési útja azonban többféleképpen is korlátozva van! Természetes barriert jelentett pl. a növények elvándorlásában majd visszatelepülésében Európában a jégkorszakok idején is a vándorlás útjára merőleges Ny–K irányú lánchegység rendszer jelenléte. Ennek következménye pl. az, hogy ma az európai mérsékeltövi lomboserdőket mindössze 10–12 fafaj alkotja, míg Észak Amerikában, ahol az É–D irányú flóravándorlásnak ilyen akadálya nem volt az erdőalkotó fafajok száma több mint a duplája (Whittaker 1975). Ez a hegylánc barrier Európában most az Észak felé történő vándorlást akadályozza.

Az élővilágnak sajnos a természetes barrierok mellett egy új típusú problémával is szembe kell néznie a megváltozó éghajlathoz való alkalmazkodás során. A populációk vándorlását befolyásoló legfontosabb tényező ma már a természetes tájak ember által történt feldarabolása, a természetes élőhelyek megszüntetése, minimális foltokká váló zsugorítása (Schneider & Root 2001). Collingham & Huntley (2000) például a kislevelű hársat (*Tilia cordata* Mill.) vizsgálva megállapította, hogy ha a megfelelő élőhely aránya a tájban 25% alá esik, a faj terjedési esélyei drámaian leromlanak. Mint ismeretes, Európa síkvidéki területeinek nagy részén az erdőterületek aránya ez alatt az érték alatt marad, így még ennek az Európa-szerte közös, gyakori fafajnak az esetében is kétséges, hogy tud-e vándorlással válaszolni az éghajlatváltozás kihívásaira.

A változások vesztesei és nyertesei

Az éghajlatváltozás hatására valószínűleg egyaránt lesznek ritkábbá és gyakoribbá váló fajok. Sok helyen többségben lehetnek ez utóbbiak, hiszen a Föld biodiverzitása a hidegebb éghajlatú területektől a melegebbek felé fokozatosan nő. Elsősorban a nagy ökológiai tűrőképességű, sokféle élőhelyen megjelenő, rövid reprodukciós ciklusú, könnyen terjedő lágyszárú növényfajok előretörése várható (De Groot *et al.*

1995). Az eltűnő fajok ezzel szemben az őshonos flórák gyengébb terjedőképességű, bolygatásra érzékeny, specializálódott fajai közül fognak kikerülni, és sajnos várhatóan nem egy faj léte a teljes elterjedési területén veszélybe fog kerülni. Davies és munkatársai (2000) ausztráliai vizsgálatai kísérleti eredményeket szolgáltatnak arra nézve, hogy mely tulajdonságaik jelzik leginkább a fajok sérülékenységet, veszélyeztetettségét. Ezek szerint öt általuk vizsgált tényező közül a legfontosabbak: a faj gyakorisága (a ritkább fajok veszélyeztetettebbek), elszigeteltsége (az elszigetelt, kis populációk sérülékenyebbek) és a táplálékláncban elfoglalt helyzete (a lánc csúcán lévő fajok vannak jobban veszélyben). A testméret, valamint a rendszertani helyzet azonban nem volt kimutatható hatással a fajok veszélyeztetettségére. Növények esetében a fajok veszélyeztetettségét jelző bélyegek sorát még ki lehet egészíteni két igen fontos tulajdonsággal: a magbank perzisztenciájával, és a magvak terjedőképességével (Geertsema *et al.* 2002).

Az éghajlatváltozás által kiváltott flóravándorlás vizsgálatokor egyértelműen a szaporítóképletek hosszú távú terjedésének lehetőségei a meghatározók. Ezeknek a viszonylag ritkán bekövetkező hosszú-távú terjedési eseményeknek a gyakorisága döntően meghatározza az egyes fajok vándorlási képességét (Cain *et al.* 2000, Cain *et al.* 2003, Greene & Johnson 1995, Nathan *et al.* 2003). Ilyen események nélkül a zonális növénytakaró valószínűleg még (a küszöbön állónál valószínűleg egy nagyságrenddel lassabb lefutású) jégkorszak utáni felmelegedést sem tudta volna követni. Sajnos erről a sokféle környezeti tényezőtől függő, nehezen vizsgálható jelenségről ma még meglehetősen kevés információval rendelkezünk, és elképzelhető, hogy a jövő „konzervációbiológiájának” gerincét e fontos eseményeknek a rendszerszemléletű „menedzselése” („eco-engineering”) fogja majd alkotni.

Magyarországi tapasztalatok és előrejelzések

A nemzetközi irodalom egy jelentős része természetközeli tájak élővilágából származó adatokat dolgoz fel, és ez alapján von le következtetéseket. Ehhez képest az éghajlatváltozásnak hazánk természetes élővilágára gyakorolt hatásai elemzésekor nem lehet eltekinteni attól a tényről, hogy a klímaváltozás Magyarországon – Európa nagy részéhez hasonlóan – nem egy érintetlen természeti tájat, hanem egy erősen antropogén hatás alatt álló, átalakított és mozaikos tájat érint, amelyben dominálnak a kultúrtáj részletek. A természetes öfenntartó rendszerek relatíve elszigetelt mozaikokban vannak jelen, ami a klímaváltozás hatásaira való érzékenységet és veszélyeztetettségüket jelentősen növeli. Ezért általában nehéz, számos esetben lehetetlen különválasztani a közvetlen antropogén és a klimatikus hatásokat. Egy jövőbeli, hatékonyabb természetvédelmi tevékenységet és politikát tehát feltétlenül ehhez az adottsághoz kell alakítani, hogy lépést lehessen tartani a változásokkal, és biztosítani lehessen a biodiverzitás és a természetes erőforrások megvédését, fenntartását.

A klímaváltozás Magyarország természetes élővilágára gyakorolt hatásainak bemutatása az eddig végzett folyamatos megfigyelések, hosszú távú adatgyűjtések,

ismételt felmérések és térképezések, ökológiai terepkísérletek, a tér-idő megfeleltetés és bioklimatikus modell-projekciók eredményeire alapozódik.

Megfigyelt változások

A hazai megfigyelésekben többnyire sajátosan összemosisódnak a fiziológiai, fenológiai, fajok elterjedésére és közösségek átalakulására vonatkozó megfigyelések.

Egy példát nyújt a határozott fenológiai trendekre a magyar méhészek által 150 éve vezetett fenológiai naptár, melyből kimutatható, hogy az akác virágzása az elmúlt másfél évszázad alatt 3–8 nappal korábbra került (Walkovszky 1998).

Magyarországon is tapasztalható a déli eredetű, termofil, közöttük több tömeges, inváziós faj megjelenése (Solymosi 1992), valamint az utóbbi évtizedek enyhébb telei nyomán kerti dísznövények kivadulása (Fekete & Varga 2006). Kozár publikációi (Kozár *et al.* 2004, 2006) és az erdészeti fénycsapda adatok a rovarok terén is jelzik a melegkedvelő déli fajok megjelenését és terjeszkedését valamint a nedveskedvelő lepkefajok visszaszorulását. A repülő rovarok jó indikátorok, mert nagy egyed és fajszám, rövid generációs idő jellemző rájuk, így gyorsan reagálni képesek a változásokra, és reakciójuk látványos, jól detektálható (Kozár *et al.* 2004). A magyarországi immáron 40 éve működő fénycsapda-hálózat adatai ezért igen fontosak. Idősor-elemzések, összefüggés-vizsgálatok a hőségnapok mennyiségével egybeeső populációs csúcsokat mutattak ki az araszolóknál. A hőségnapok felszaporodásával azonban a gradációs csúcsok elmaradtak. A nagylepkék monitorozásának tanulsága szerint a fajdiverzitás hosszútávon csökkenő trendet mutat. Angliai monitorozási adatok ugyanezt a tendenciát igazolták.

Az aszályos évek halmozódása fokozza az erdőkben a fapusztulást (Csóka *et al.* 2006). Az aszályosság a rovarkártételeket is fokozza. Korábban jelentéktelen, szupresszált fajok berobbanhatnak és erős kártevővé válnak. Kifejlődésük meggyorsulhat, több nemzedék jön létre egy év alatt, ennek kedvez a vegetációs periódus meghosszabbodása is. E rovarkártételek kettős okkal magyarázhatók. Egyik a fák szárazság okozta ellenálló képesség csökkenése, másik a kártevők kedvező hőmérsékleti viszonyok okozta gradációja.

Síkfőkút hosszú távú öklógiai kutatóállomáson (LTER site) 30 év alatt a tölgyek majdnem két harmad része kipusztult. A kocsánytalan tölgy pusztulásának mértéke jelentősen meghaladta a csertölgyét, egyéb lombhullató fafajok, elsősorban a mezei juhar térhódítása a jellemző, a lombkorona nyíltabbá válásával a cserjeszint jelentősen megerősödött (Tóth *et al.* 2006). A versengő fajok vízgazdálkodásában jelentős különbségek lehetnek: vízforgalmi vizsgálatok a csertölgynek a kocsánytalan tölgyénél jobb vízszállítási és tárolási sajátságaira mutattak rá.

A természetközeli élőhelyek megújulási, fennmaradási esélyeit a földhasználat módja is jelentősen befolyásolhatja (pl. a nagy kiterjedésű erdőirtás kedvezőtlen az erdő felújulására nézve). Országszerte megfigyelhető már ma is a nagy kiterjedésű tarvágások mikroklimatikus szárító hatása, amely hátráltatja a sikeres felújulást és pozitív visszacsatolás révén az erdőtlenség kialakulásának irányába hat (Noss 2001).

Az eddig megfigyelt változások részben és elsősorban a szárazodás – csapadék és talajvízszint csökkenés – másrészt a hőmérséklet emelkedése következményeként tapasztalhatók. Igen fontosak és jelentős prediktív potenciállal rendelkeznek az extemitások (pl. a 2000 és 2003 évi aszályok) hatására tapasztalt változások (Ciais *et al.* 2005, Kovács-Láng *et al.* 2005, Kröel-Dulay *et al.* 2006, Parmesan *et al.* 2000). Az elmúlt évek (elsősorban 2000 és 2003) hosszantartó tavaszi-nyári eleji szárazsága és a nyári igen magas hőmérséklet a KISKUN LTER mintaterületen (Fülöpháza) az aszály hatására beinduló folyamatok részletes vizsgálatára teremtett lehetőséget. A tapasztalatok szerint a növények eltérő tűrőképessége nyomán jelentősen átrendeződtek a homokpusztagyep fajainak tömegességi viszonyai. A humidabb körülményeket igénylő C3 fotoszintézis típusú évelő fűvek, elsősorban a bennszülött domináns *Festuca vaginata* (W. et K.) jelentős pusztulást mutatva háttérbe szorult, míg a magas hőmérséklethez és vízkorlátozáshoz jobban adaptált C4-es fűvek, mint pl. *Cynodon dactylon* ((L.) Pers.) és a mélyen gyökerező cserjék alig szenvedtek károsodást (Kalapos *et al.* 2006). Az ismételt aszály az évelő fűvek összborítását 23%-ról 10%-ra csökkentette. Az első aszály után az évelő kétszikű fajok még meg tudtak erősödni, de a 2003.-as ismételt szárazság ezek tömegességét is visszavetette. Az aszály okozta mortalitás helyenként olyan jelentős volt, hogy nagy területekről eltűnt az évelő, sztyepp típusú gyepek, s az egyévesek és mohák-zuzmók által dominált sivatagi jellegű növényzet a terület 5%-áról annak 30%-ára terjedt ki. A legnagyobb kiterjedésű elpusztult foltok a táj legnyúltabb, szinte teljesen fátlan részein alakultak ki (Kovács-Láng *et al.* 2005). Az eddigi vizsgálatok három dologra hívják fel a figyelmet: (1) beigazolódni látszik az a teória, hogy a nagymértékű pusztulások a stressz fokozódásával nem lineárisan, hanem egy bizonyos küszöböt átlépve hirtelen következnek be, (2) a kritikus táj-átalakulások bekövetkeztében nem csak az egyes stressz-események intenzitásának, hanem azok visszatérési gyakoriságának is kulcsfontosságú szerepe van, (3) egy-egy tájrészlet ellenállósága önmagában nehezen értékelhető, az ellenállóság mértékét mindenképpen táji kontextusban kell értelmezni.

A kutatásokból származó adatokon kívül a nemzeti parkok terepen dolgozó szakemberei sok olyan jelenséget és folyamatot figyeltek meg és dokumentáltak, ami ha nem is kizárólagosan de nagy eséllyel a klímaváltozáshoz is kötődik (2. táblázat).

2. táblázat. A hazai Nemzeti Park Igazgatóságok szakemberei által megfigyelt, az éghajlatváltozáshoz köthető változások összefoglalása

Elsősorban a szárazodás következtében beállt változások

a Balaton és Fertő tó vízszintje csökkent, a parti zonáció átrendeződött,

a parti kövezésen kialakult vándorkagyló telepek kiszáradtak, biomasszájuk csökkent, így a telelő madarak táplálékbázisa jelentős mértékben lecsökkent,

a Balatonba befolyó patakok vízhozama csökkent, halfaunájuk átrendeződött és elszegényedett,

a Dél-Tiszántúlon a szikes tavak nyáron korábban száradnak ki, korlátozva a sziki élővilág létét,

a Duna-Tisza közti Homokhátság területén a talajvízszint drasztikus csökkenésével a szikes tavak élővilágukkal együtt eltűntek, helyüket szikes gyepek foglalták el,

a Homokhátságon a vizes élőhelyek összeroppanása, a társulások átrendeződése tapasztalható, a buckaközi láprétek az utóbbi 30 évben kiszáradtak, eredeti növényzetük és fajaik eltűntek,

a Nagyberek területén a lápszemek élővilágukkal együtt eltűntek,

az Őrség számos forrása kiszáradt, a vizük által táplált speciális élőhelyek részben elpusztultak,

a folyókon a vízjárás szélsőségesebb lett, megváltoztatva az árterek élővilágának dinamikáját, fokozódó gyomosodást okozva, fokozott teret engedve az inváziós fajok (gyalogakác, aranyvessző, pirosvirágú nyenyúljhozzám) terjedésének.

a Duna-Tisza közti homoki tölgyesek szárazodásával megszűnt bennük a természetes újulat,

a Bélmegyeri fáspuszták pusztulása felgyorsult,

a sziki tölgyesekben a dominanciaviszonyok a csertölgy és olasz tölgy újulásával eltolódni látszanak,

az Északi Középhegység bükköseinek aljnövényzetében a szárazsággkedvelő fajok terjedése figyelhető meg,

az Őrség területén a bükkösök talaja szárad, a nedvességigényesebb Atlanti–Mediterrán elterjedésű növényfajok gyakorisága csökkent,

az Őrség lucosai tömegesen száradtak ki részben a vízellátás romlása, részben a tömeges rovarkártétel miatt,

a zalai illír bükkösök szárazodása nyomán jelentősen növekedett a bükkfaszú kártétele

a ragadozó futóbogarak közül a nedvességkedvelő fajok a kiszáradt élőhelyekről elvándoroltak.

a Dunántúli Középhegységben a nedvességkedvelő nagylepkék fajszáma és tömegessége jelentősen csökkent,

Főként a melegedés számlájára írható változások

déli eredetű, termofil, közöttük több tömeges inváziós növényfaj megjelenése,

egyed déli eredetű kerti dísznövények kivadulása,

az enyhébb teleket kedvelő erdei liánok tömegessé válása,

melegkedvelő vízi gyomok (pl. *Pistia*) áttelelése,

nyári vízvirágzások gyakoribbá válása,

a fénycsapda adatok a melegkedvelő déli rovar és pókfajok megjelenését és terjedését mutatják,

a XX. században behurcolt rovarkártevők felszaporodása az enyhe telű és meleg nyarú években,

vonuló madarak vonulási idejének változása, korábban délre vonuló fajok áttelelése enyhe teleken,

megfigyelhető, a nálunk korábban ritka déli elterjedésű imádkozó sáska közönségessé és tömegessé válása,

az enyhébb telek és hosszabb vegetációs periódus a rovarkártevők több generációjának kifejlődését, így fokozott kártételt okozzák (*Lymantria* gradáció a Bakonyban),

Kísérleti eredmények

Hazánkban több helyen is folytak, folynak klímaszimulációs kísérletek, melyek a prognosztizált mértékű klímaváltozásnak megfelelő körülmények szimulálásával kiváltható ökológiai válaszokat teszik mérhetővé.

Az egyik vizsgált tényező a légkör megemelkedett CO₂ tartalmának direkt hatása. A nagyobb koncentrációban jelen lévő CO₂ növeli a fotoszintézis és a növényi vízgazdálkodás határfokát, így elvileg mérsékli a szárazodás következményeit. Fontos azonban tudni, hogy a CO₂ trágyázás hatása megváltoztathatja a primér producensek kompetíciós viszonyait is (Tuba 2003). Hosszabb távú hatása különösen a biodiverzitásra és az ökoszisztéma funkciókra egyelőre megfelelő ismeretek híján azonban jósolhatatlan.

A homoki erdőssztyepp mozaikos biómjában (KISKUN LTER site) végzett klímaszimulációs terepkísérletek a hőmérséklet emelésének és a szárazságkezelésnek az ökoszisztéma funkciókra gyakorolt hatását (mintegy előrehozott válaszokat) kívánták feltárni. Az eredmények azt mutatják, hogy a domináns komponensek egymástól eltérően reagálnak: (1) A hőmérséklet emelése a *Populus alba* korábbi rügyfakadását és későbbi lombhullását idézte elő, vagyis e faj számára a vegetációs periódust meghosszabbította (Kovács-Láng et al. 2006a). Emellett a hőkezelés növelte a gyeppen található ízeltlábúak mennyiségét is. (2) Az alkalmazott mértékű szárazságkezelés (csapadékkizárás a vegetációs periódus csúcsidőszakában) a

klonális *Populus alba* (L.) fotoszintetikus aktivitását és növekedését nem gátolta, míg a domináns gypalkotó *Festuca vaginata* fitomassza-produkcióját jelentősen csökkentette, pusztulását gyorsította, és száraz avar felhalmozódását eredményezte (fokozott tűzveszély) (Kovács-Láng *et al.* 2006b). (3) A szárazságkezelés csökkentette az avarbontás sebességét, korlátozta a víz, C, N és P forgalom volumenét, csökkentette a N mineralizáció intenzitását, és korlátozta a talajlégzést. Mindezek alapján a felmelegedés és szárazodás, és különösen az aszályos évek gyakoriságának növekedése a homoki erdőssztyep biomban csökkenteni fogja az ökoszisztémák szervesanyagképző képességét, és a talaj széndioxid kibocsátását, vagyis a szénforgalom volumenét, ami a gyenge termőképességű talajok termőerejének további csökkenéséhez, és így elsivatagosodáshoz vezethet.

Előrejelzett változások

Modellezett előrejelzések

Mint már a nemzetközi irodalom ismertetésénél látni lehetett (pl. Araujo *et al.* 2004), hazánk élővilága a klímaváltozás következtében jelentős, Európa többi országához viszonyítva is kimagasló mértékben van veszélyben. Ugyanakkor még alig készültek Magyarországra a természeti környezet várható sorsát, veszélyeztetettségét részleteiben is bemutató, feltáró előrejelzések, projekciók. A legjelentősebb ilyen irányú munkák eddig az erdészeti szektorhoz kötődnek, ahol Mátyás és munkatársai (Gálhidy *et al.* 2006, Mátyás 2004, Mátyás & Czimber 2000, 2002) próbálta meg bioklimatikus modellek segítségével feltárni a legfontosabb erdőalkotó fajoknak, illetve a klímazonális zárt erdők várható maximális elterjedésének határait. Eredményeik szerint az erdőssztyepp-öv várhatóan ki fog terjedni, míg ugyanakkor mind a bükk, mind a kocsánytalan tölgy jelentős jövőbeli visszaszorulását jelzik. E két fajjal előrejelzett visszaszorulásával sajnos az utóbbi évtizedek terepi tapasztalatai is meglehetősen egybecsengenek (lásd 2. táblázat).

A homoki erdőssztyepp biomban várható változások előrejelzésére hasznosnak bizonyult a klímagrádiens mentén történő tér-idő megfeleltetés módszere (Kovács-Láng *et al.* 2000, Kovács-Láng *et al.* 2002). Ennek alapját az képezi, hogy egy Győr és Kecskemét között létező ariditási grádiens végpontjai közötti klimatikus különbség a térségben 25 éven belül várható klimatikus változásnak felel meg. A grádiens mentén az erdőssztyepp tájmozaik szerkezete változik. Az ariditás fokozódásával Kecskemét felé az erdőfoltok zsugorodnak, a növényzet egyre nyíltabbá válik (amihez a tájhasználat módja is hozzájárult). A Kisalföldön mintegy 70%-os borítást mutató fajgazdag homokpusztagyep a Duna-Tisza közén felnyíló, évelő fajokban elszegényedő, a rövid tenyészidejű egyévesek felszaporodásával jellemezhető, szinte félsivatagi gyp képét mutatja. A melegedés és szárazodás tehát az elsivatagosodás folyamatának bekövetkeztét vetíti előre, amit az aszályos évek pusztulást okozó hatásai is megerősítenek.

3. táblázat. A természetvédelem éghajlatváltozás általi sérülékenységeinek összefoglalása egyszerű hatás–következmény mátrixban (+ +: igen pozitív, +: pozitív, -: negatív, --: igen negatív következmények)

	fiziológiai változások	fenológiai változások	védendő fajok visszahúzódása	inváziók (gyomok, kártevők)	társulások és táplálék-láncok átrendeződése
általános melegedés	(+)	–	–	–	–
a telek enyhülése		–		--	–
szárazodás, aszályosodás	--		--	–	--
a csapadékeloszlás változásai	–		–	–	--

A természetes élővilágot érintő további várható változások

A szakértői vélemények és tapasztalatok alapján a modellezett előrejelzéseken kívül az alábbi fontosabb változások várhatóak a klímaváltozás következtében Magyarországon természetes élővilágában:

- Várható a relatíve nedves- hűvös élőhelyek fajainak visszahúzódása.
- A speciális, elszigetelt élőhelyek szűktoleranciájú, nehezen mozgó fajai különösen veszélyeztetetté válnak.
- Várható, hogy folytatódik a melegkedvelő fajok eddig is megfigyelt északra terjedése és felszaporodása, a nedvességkedvelő növény és állatfajok további viszsza-szorulása, a szárazságtűrő fajok előretörése.
- Várható a zonális vegetáció határainak eltolódása, az erdőzóna visszahúzódása, az erdőssztyepp öv kiterjedésének növekedése.
- A déli, melegkedvelő fajok megjelenésével és terjedésével átmenetileg megnőhet a fajok száma, az inváziós fajok uralomra jutása azonban hosszabb távon a fajszám és a biodiverzitás csökkenése irányába hat.
- A kártevő rovargradációk nagysága várhatóan emelkedni fog, ami a szárazság sújtotta erdőkre fokozottabb veszélyt jelent.
- Az élőhelyek általános szárazodása, a jelenlegi száraz homokterületek elsivatagosodása várható.
- Az ökoszisztéma funkciók károsodása, az ökoszisztéma szolgáltatások csökkenéséhez, azok degradációjához, a természeti erőforrások kiaknázhatóságának csökkenéséhez vezet.
- Várható a természetes társulások primér produkciójának csökkenése, amely az avarbontás sebességének párhuzamos csökkenésével a szénforgalom volumenének csökkenéséhez vezet.

- A talajok kiszáradásával a talajélet és a talaj biológiai folyamatai (N-fixáció és transzformáció, talajenzim aktivitás, humifikáció) intenzitásának csökkenése, ezzel az ökoszisztéma anyagforgalmának, a biológiai ciklusnak a károsodása, a talaj tápanyagai hozzáférhetőségének romlása.
- A felhalmozódó száraz avar következtében várható a tüzesetek gyakoriságának növekedése, aminek következményei a megváltozó körülmények között beláthatatlanok.

Az éghajlatváltozásnak a természetvédelmi szektorra gyakorolt főbb hatásait és a felsorolt legfontosabb sérülékenységek közötti összefüggéseket a 3. táblázatban foglaljuk össze.

Mi a sürgős teendő?

Az Európai Unió irányelvei elvárásai és gyakorlata

Az Európai Bizottság az EU Tanácsának szóló 2006 májusában kelt (COM(2006) 216) átfogó szakmai elemzésen alapuló (Usher 2005) anyaga ajánlásokat tartalmaz a klímaváltozás biodiverzitásra gyakorolt hatásával kapcsolatosan, illetve meghatározza a káros következmények megelőzésével és csökkentésével kapcsolatos szükséges teendőket. A teendők két csoportba sorolhatók: (1) a mitigáció, a változást kiváltó tényező – itt CO₂ emisszió – csökkentése és (2) az adaptáció, amelynek során a keletkezett, vagy várható káros következmények megelőzése ill. csökkentése a cél. A természetvédelem és az ökológusok feladatai elsősorban az adaptáció területén vannak. A klímaváltozáshoz történő adaptáció magába foglalja az élővilág természetes alkalmazkodását – autonóm adaptáció – és mindazokat az emberi beavatkozásokat – tervezett adaptáció – amelyek mérséklik a veszteségeket, valamint elősegítik az autonóm adaptáció minél sikeresebb bekövetkezését.

Az autonóm adaptáció akkor sikeres, ha az ökológiai rendszerek a változó feltételek mellett is meg tudják őrizni komponenseiket, szerkezetüket és működőképességüket. Ebben a rendszerek rezisztenciája, inerciája, érzékenysége, sérülékenysége és rezilienciája alapvető fontosságú. Ez azonban nem elegendő a károsodások kivédéséhez, tervezett megelőző lépések mihamarabbi megtételére van szükség. A természetes rendszerek autonóm adaptációs képességét, és ennek a beavatkozások hatására bekövetkező változásait nem ismerjük előre, a lehető leghatékonyabb – a természet belső alkalmazkodási képességeit maximálisan kihasználó – stratégia kialakításához további kutatásokra lesz szükség.

A tervezett adaptáció során végzendő beavatkozásoknak két alapvető kategóriáját lehet elkülöníteni: (1) szektoron belüli beavatkozások (közvetlenül a biodiverzitás és ökoszisztémák megőrzésére irányul); (2) szektorközi beavatkozások (a további érintett szektorok illetékességi területén bekövetkező káros ökológiai hatások csökkentésére irányul). A kettőnek átgondolt klímapolitika keretében, összehangoltan kell történnie. A tervezett adaptációs beavatkozások lehetnek továbbá *tudományos, technológiai, intézményi, attitűdbeli, politikai, pénzügyi, szabályozási* jellegűek.

A nemzetközi dokumentumok négy általános természetvédelmi kezelési opciót tartalmaznak a kanadai nemzeti parkokra kidolgozott elvek alapján (Scott & Lemieux 2003):

statikus: az eddigi gyakorlat folytatása az eddigi preferenciák alapján;

passzív: a klímaváltozás tényének és jeleinek elfogadása az esetleges evolúciós háttér-folyamatok tudomásulvételével;

adaptív: aktív menedzsment révén maximalizálja az élőhelyek és fajok fennmaradását, adaptációját (pl. tüzek, inváziós fajok visszaszorításával), vagy lassítja az ökológiai folyamatok sebességét, ill. elősegíti az ökológiai változásokat egy új, klímaadaptált állapot felé;

hibrid: az előbbi típusok kombinációja.

A természetvédelem európai és hazai szakembereinek egyöntetű véleménye, hogy hosszabb távon a proaktív, adaptív menedzsment kezelési opció megvalósítása lehet csak eredményes (Pöyry & Toivonen 2005, Zebisch *et al.* 2005). Jó példával szolgálhat Nagy-Britannia Biodiverzitás stratégiája (DEFRA, 2006), melynek keretében 2006-2010 időszakra egy klímaadaptációs munkaprogramot dolgoztak ki, amelynek fő pontjai az alábbiak:

- egységes monitorozó-hálózat kialakítása a detektált változások módszeres gyűjtésére,
- az elfogadott adaptációs lépések megtételének beindítása,
- a szükséges szektorközi lépéseknek a további érintett szektorok tevékenységébe történő integrálása,
- a társadalom tudatosságának kialakítása,
- a kutatások folytatása és erősítése,
- egy a klímaváltozással és hatásaival foglalkozó szakértői testület létrehozása az információk gyűjtése és a legjobb gyakorlat kidolgozása és elterjesztése céljából.

A Biodiverzitás Egyezményből fakadó kötelezettségek

A Biodiverzitás Egyezmény Titkársága 2006. májusi, a klímaváltozáshoz történő adaptációval kapcsolatos anyagának (CBD 2006) irányelvei és akcióterv javaslata összhangban van az EU elvárásaival. A sikeres tervezett beavatkozásoknak 4 kulcs-tényezőjét nevezi meg:

- a *genetikai variabilitás* fenntartása,
- a populációk *regenerációs képességének* fenntartása,
- az élőhelyek *heterogenitásának* és a különböző szukcessziós stádiumoknak fenntartása,
- az élőhelyek *konnektivitásának* és a táj permeabilitásának fenntartása a környezeti gradiensek mentén.

Ez a dokumentum hangsúlyozza továbbá, hogy a klímaváltozás máris zajlik, és az adaptációs beavatkozások máris esedékesek, szükségesek és elkerülhetetlenek. A tervezett emberi beavatkozások fő célja, hogy az ökológiai rendszerek működését fenntartsa, illetve helyreállítsa. Ehhez szükségesnek tartja, hogy

- megfelelő, nagy kiterjedésű, nagy *élőhely-heterogenitású* területeket biztosítunk a természetes élővilágnak, megadva a populációknak a mozgás és élőhely-választás, csere lehetőségét, elkerülve a fragmentációt;
- próbáljuk *kiküszöbölni* az egyéb *stresszek* (inváziós fajok, túlhasználat, szennyezések) hatásait;
- jól tervezett *adaptív menedzsmentet* alakítsunk ki, amelynek folyamatába a hatáskövető monitorozás is beépül.

Az adaptációs tevékenységek tervezésére különböző módszerek és eszközök léteznek, amelyek különböző léptékben (lokális, regionális, országos) alkalmazhatók. A két fő megközelítési mód a modellezés vagy scenárió indíttatás („top-down”), és a közösség, vagy sérülékenység indíttatás („bottom-up”) egymással általában komplementerek. A költség-haszon elemzés és a multikritérium analízis szintén szerepet játszik az adaptációs intézkedések tervezésében a különböző szinteken. Ehhez megfelelő széles spektrumú szakembergárda átgondolt munkája szükséges.

A Biodiverzitás Egyezményt aláíró és kötelezettséget vállaló minden országnak rövid időn belül el kell készíteni adaptációs stratégiáját és akciótervét, amelynek készítése és megvalósítása az érintettek tájékoztatásával, bevonásával és aktív részvételével kell, hogy történjék. A megvalósításhoz a pénzügyi források biztosítása szükséges.

A legtöbb országban eddig elfogadott alapvető intézkedések az alábbiak:

- a védett területek kiterjesztése,
- a sérült ökoszisztémák restaurációja,
- a szennyezés csökkentése,
- a fenntartható forráshasználat gyakorlatának megvalósítása.

Az adaptációs tevékenységnek azonban vannak korlátai is. Ezek elsősorban a megfelelő ismeretek és tapasztalatok hiányából, ezek szintézisének hiányából, megfelelő technológiák hiányából, a tudatosság és politikai hajlandóság hiányából fakadnak. Ezért igen fontos erősíteni az adatgyűjtést és eszközfejlesztést, a kutatókat, a kommunikációt és a közösségek bevonását.

A veszteségek megelőzésének vagy csökkentésének lehetőségei Magyarországon

A mitigációs tevékenység lehetséges természetvédelmi vonatkozásai

A mitigációs erőfeszítések alapvető célkitűzése az éghajlatváltozás hajtómotorjának számító légköri üvegházgázok, köztük elsősorban a fosszilis energiahordozókból származó CO₂ emisszió csökkentése. Ennek érdekében stratégiai cél kell, legyen az alternatív energiaforrások (napelemek, szélfarmok, geotermikus erőművek, energiaültetvények) hadrendbe állítása, valamint a szén-dioxid hosszú távú megkötését, légkörből való kivonását szolgáló „klímaerdők” létesítése is. A mitigáció érdekében végzett tevékenységek többsége természetvédelmi szempontból semleges, vagy csak közvetve (pl. külszíni szénbányászat visszaesése által) érinti a természetvédel-

met (természetesen a közvetlen környezetére minden létesítmény erős hatást gyakorol, úgyhogy az engedélyeztetési eljárás során a természetvédelmi szakhatóságnak is fontos szerepe kell legyen). A jövő klímapolitikájának mitigációs eszköztárából azonban itt mindenképpen ki kell emelni két természetvédelmi szempontból is fontos elemet:

- az *energiaültetvényeket*, melyek esetében a képződött biomassza rövid távú energetikai hasznosítása, és ezáltal minél több fosszilis tüzelőanyag kiváltása a cél, illetve
- az ún. *klímaerdőket*, ahol a szén-dioxid légkörből való hosszú távú kivonása a cél, melyek a Kyoto-i rendszerű emisszó-kereskedelem segítségével válhatnak finanszírozhatóvá

Mindkét, a természeti környezet állapotára alapvetően és nagy területeken hatást gyakorló esetben igen fontos, hogy az érintett szektorok (energiaügy, agrárium, erdőszet, természetvédelem) együttesen dolgozza ki e tevékenységek majdani szabályozási kereteit. A jövő sikeres természetvédelmi tevékenységéhez elengedhetetlen, hogy a természetvédelem szempontjainak is érvényesülniük kell ezek között. A klímaerdők esetében további fontos szempont, hogy azok létesítését gondos éghajlati-ökológiai előkészítés alapozza meg, hiszen csak így biztosítható ezeknek a szén-raktározó ökoszisztémáknak a hosszú távú ökológiai stabilitása.

Az adaptáció lehetőségei és a szükséges intézkedések

A természetes ökológiai rendszerek adaptációs képessége, mint az a már korábban leírtakból is kitűnik, sajnos véges. Az élőhelyek adaptációs képességének három fő tényezőjét azonosíthatjuk, melyek három különböző térbeli léptéket képviselnek, és együttesen döntően meghatározzák az ökológiai rendszerek és a biológiai sokféleség alkalmazkodóképességének a lehetőségeit, ezek:

- az élőhely természeti állapota (minél természetesebb fajösszetétel, szerkezet, vízellátottság, stb.)
- az élőhelyek környezetének (élőhelymozaik) természetessége, termőhelyi és élőhelyi változatossága, gazdagsága
- a tágabb táj, a természetes élőhelyeket körülvevő kultúrtáj („mátrix”) átjárhatósága az élőhelyek fajai számára.

Ez azt jelenti, hogy mindazok a politikai, szabályozásbeli, vagy gyakorlati változtatások és intézkedések, amelyek szándékosan vagy akaratlanul megváltoztatják e három tényező valamelyikét, azok az élőhelyek, a táj éghajlatváltozással szembeni ellenálló képességét is döntő mértékben befolyásolhatják.

A fentebbi felsorolásból látható hogy az ökológiai rendszerek adaptációs képességére, nem csak a természetvédelmi szektor van hatással. Míg stabil környezeti feltételek között sok faj és élőhely jó eséllyel megőrizhető megfelelő méretű természeti területek (nem csak védett területek) megőrzésével addig egy megváltozó klímában – amikor is a fajok vándorlása és az élőhelyek elmozdulása várható – nagy

jelentősége lesz a tágabb környezet állapotának, ami döntően más szektorok kezelésében van. Egy jelentős klímaváltozás esetén (amire a következő évtizedekben sajnos nagy esélyünk van) a biológiai sokféleség megőrzéséhez az szükséges, hogy a természetvédelmi szempontokat minden érintett szektor tevékenységébe integráljuk. Szektorközi együttműködés és összehangolt szabályozás nélkül eredményes alkalmazkodás nem képzelhető el. Ez jelentős részben a már ezekben a szektorokban folyamatban levő programoknak (Agrár- és erdő-környezetvédelmi program, Pro Silva típusú erdőgazdálkodás, Víz Keretirányelv) kiteljesedését és ökológiai szempontok szerinti esetleges továbbfejlesztését jelentheti.

Az elvégzendő feladatok két fő csoportba sorolhatók: egyrészt (1) a helyben történő adaptáció elősegítéséhez szükséges a **meglévő biológiai sokféleség megőrzése, élőhelyeik természeti állapotának fenntartása és javítása**, másrészt (2) a fajok vándorlási lehetőségének megteremtése érdekében szükséges a természeti területeket körülvevő **táj átjárhatóságának fokozása**. A javaslatok egy része rövidebb távú „konzerváció elvű” (a jelenlegi állapot fenntartására törekvő), más része hosszabb távra szóló „transzformáció elvű” (a kivédhetetlen változások kevésbé kedvezőtlen irányba történő befolyásolására törekvő) javaslat. A természetes élővilág autonóm adaptációját elősegítő lépéseket szektoronkénti bontásban vizsgáljuk.

(1) A helyben történő adaptáció elősegítése, a meglévő biológiai sokféleség megőrzése, természetességének fenntartása és javítása érdekében (nem csak a védett területeken):

Természetvédelem: a klímaváltozásra érzékenynek tartott élőhelyek és fajok prioritási listáinak kialakítása; a vizes élőhelyek vízmegtartó képességének helyreállítása, esetleges vízpótlási lehetőségek kidolgozása; a szükséges élőhely-rekonstrukciók megvalósítása illetve folytatása; az élőhelyek heterogenitásának, mozaikosságának és különböző szukcessziós stádiumoknak a fenntartása; a monitorozó tevékenység erősítése; a várhatóan megnövekvő inváziós veszélyt csökkentő, az elfogadható (legkevesbé rossz) kolonizációkat segítő kezelési módok bevezetése.

Vízgazdálkodás: a vízlevezetés kényszerének feloldása; a tározók ökológiai szempontok figyelembevételével történő üzemeltetése; vízjogi engedélyeztetés rendszerének felülvizsgálata (talaj és mélységi vizek használata).

Erdészet: a védett területeken a természetszerű erdőgazdálkodás, a nem védett, de természeti értéket hordozó erdőkben természetközeli erdőgazdálkodás folytatása; puffertérületek biztosítása az érzékeny élőhelyek környezetében.

Mezőgazdaság: a hagyományos tájgazdálkodás elemeinek (gyepek kaszálása, legeltetése), fenntartása, újraélesztése; puffertérületek biztosítása az érzékeny élőhelyek környezetében, és elsősorban itt, de lehetőleg máshol is a kevésbé intenzív, kisebb környezetterheléssel járó gazdálkodási módok előtérbe helyezése.

(2) A természeti területeket körülvevő táj átjárhatóságának fokozása, a fajok vándorlásának elősegítése érdekében (elsősorban a ma védelemben nem részesülő területeket érintő intézkedések):

Természetvédelem: a természetes élővilággal rendelkező területek közti konnektivitás, a vándorlás lehetőségének biztosítása; a különböző védettségi státuszú területek, valamint a Nemzeti Ökológiai Hálózat értékelése éghajlatváltozási szempontból, konfliktuspontok azonosítása; a természetvédelmi és Natura 2000 területek továbbfejlesztése (területnövelés), a határaik flexibilissé tétele, hogy esetleg évtizedek távlatában változtatni lehessen a fajok és társulások elmozdulásának megfelelően.

Vízgazdálkodás: ökológiai szempontú, a Víz Keretirányelv javaslatainak megfelelő vízgazdálkodás; ártéri vízgazdálkodás közelítése a természeteshez; csatornahálózat felülvizsgálata; vizes élőhelyek területének növelése.

Erdészet: a természetszerű erdőkre és az erdészeti ültetvényekre vonatkozó szabályozások elkülönítése (ez a művelési ágak jelenlegi rendszerének megváltoztatásának szükségességét is jelentheti); az erdőművelés gyakorlatának megváltoztatása, a természetszerű (pl. Pro Silva mozgalom) gazdálkodás elterjesztése, nagy-kiterjedésű tarvágások megszüntetése; az erdőssztyepp zónában kis záródású erdők fenntartása; erdőtelepítések lehetőleg őshonos fafajokkal, mind a jelenlegi erdőzóna, mind az alföldi erdőssztyepp területeken.

Mezőgazdaság: az agrártáj heterogenitásának, mozaikosságának (mezsgyék, sövények, fasorok, kis parcellaméret) növelése; talaj- és vízkímélő technológiák alkalmazása; extenzív és ökológiai gazdálkodási formák előtérbe helyezése.

Közlekedés: ökológiai átjárók (vadátjárók) létesítése a főutakon és az autópályákon, ezek szegélyére őshonos fajokból álló sövények erdősávok telepítése.

A természetesség, és az ezzel együtt járó változatosság fenntartása egy olyan általános alapelv lehet a klímaváltozás adaptációs részében, aminek alkalmazásával nemcsak a természetvédelemben de általában is csökkenthetők a klímaváltozás káros hatásai. Példa lehet erre (1) a vízgazdálkodásban a Tisza-szabályozás újragondolása (Vásárhelyi Terv Továbbfejlesztése); (2) erdőkben, erdészeti ültetvényekben a genetikai sokféleség növelése (változó klimatikus feltételek, új kórokozók felbukkanása esetén lehetőség a szelekcióra), a szerkezeti változatosság növelése (egykorú fákból álló erdők sérülékenyebbek szél- és jégtörésre); (3) a városi zöldfelületek növelése.

A szektorok közötti együttműködés mellett további fontos feladat a hazánkban tervezett lépések összehangolása a szomszédos államokban végzett / végzendő hasonló beavatkozásokkal. Optimális adaptációs és mitigációs tevékenység nem képzelhető el hatékony nemzetközi együttműködés nélkül. A stratégiák összehangolása a természetvédelem területén így nemcsak egy, az Európai Unió által felülről érkező követelmény, hanem egyben a hatékony védekezés szükséges feltétele is.

A legfontosabb kutatási feladatok

Mint ahogy a tervezett adaptációs lépéseknek, a további kutatási feladatoknak is igen fontos kritériuma a szektorköziség és a nemzetköziség. Mivel az éghajlatváltozás és hatásai univerzálisan jelentkezik, az eredményes alkalmazkodáshoz a problémákat a különböző szektoroknak (mezőgazdaság, erdészet, vízügy, természetvédelem, energia, egészségügy, katasztrófavédelem) együttműködve kell megoldania. Előfordulhat ugyanis, hogy egy probléma leghatékonyabb megoldásához a leginkább érintett szektoron kívül egy hagyományosan valamely más szektor hatáskörébe tartozó területen is szükségesek intézkedések. Az itt felvázolt kutatási célok közül is mindegyiknél fontos a szektorok közötti kommunikáció, de azokat a feladatokat, amelyek esetében gyakorlatilag létfontosságú a szektorok közötti együttműködés külön is megjelöltük egy csillaggal (*). Emellett fontos még az is, hogy a jövőben el kell mozdulni a klímaváltozás hatásának elkülönült vizsgálatától, és egyre inkább az éghajlatváltozásnak és a természeti – társadalmi – gazdasági következményeknek az együttes kezelése, modellezése felé kell eltolódjanak a kutatások.

Egy másik hasonlóképp fontos cél hazánk földrajzi fekvését is figyelembe véve, hogy ahogy a jövőnkben jórészt osztoznunk kell a szomszédainkkal, ugyanígy a kutatások is együttműködésben szülessenek! Nincs értelme annak, hogy pl. minden közép-európai kis állam saját maga végezze el külön-külön a rá nézve veszélyes adventívek azonosítást, hiszen várhatóan óriási átfedések lesznek az eredményekben, arról nem is beszélve, hogy jó minőségű előrejelzések készítéséhez egymás adataira is szükségük lesz. Egy további szempont lehet, hogy az Európai Unió is elsősorban a nemzetközi együttműködésekben megvalósuló kutatásokra ad pénzt. Azokat a kutatási célokat, amelyek megítélésünk szerint igazán eredményesen csak nemzetközi együttműködésben vihetők véghez (+) jellel emeltük ki.

(1) Bioklimatikus modellek készítése hazai fajokra, élőhelyekre:

- fajok és élőhelyek klíma általi meghatározottságának (klímaérzékenységének) vizsgálata, különös tekintettel a közösségi jelentőségű fajokra és élőhelyekre (+),
- a védett és a domináns, társulásalkotó fajok klímaérzékenységének, veszélyeztetettségének bioklimatikus modellezése, projekciók készítése (+),
- potenciálisan veszélyes új adventívek azonosítása, várható elterjedésük bioklimatikus modellezése (*+).

(2) Az élővilág klímaváltozásra adott reakcióit befolyásoló tényezők és a változások mechanizmusainak feltárása:

- a veszélyeztetett fajok és élőhelyek aktuális térbeli mintázatának és potenciális vándorlási lehetőségeinek kiértékelése, várható faj- és élőhelymozgások becslése,
- a természetközeli területeket körülvevő mátrix átjárhatóságának vizsgálata, modellezése különböző tájhasználati módok és intenzitások függvényében különböző élőlénycsoportok esetére (*),

- a társulások szerveződésének és stabilitásának, a fajcserék mechanizmusának vizsgálata, a bolygatási-rezsim (tüzek) várható változásainak modellezése,
 - a klímaszimulációs ökológiai terepkísérletek folytatása és fejlesztése elsősorban az ökoszisztéma működések vonatkozásában (+),
- (3) A bekövetkező változások, és az arra adott válaszlelések hatásainak nyomkövetése, indikátorok és monitorozó rendszerek kidolgozása:
- az éghajlatváltozás-hatások monitorozási lehetőségeinek vizsgálata, és illesztése a már működő monitoring-rendszerekhez (NBmR, Natura 2000, fénycsapdahálózat, pollenhálózat), esetleg kiegészítő monitorozás tervezése (*+),
 - a természeti környezet állapotát átfogóan jellemző indikátorok kifejlesztése (*+)
 - a tervezett konkrét adaptációs beavatkozások esetében, az egyes beavatkozások nyomon követő monitorozásának megtervezése (*),
 - a klímaváltozáshoz kötődő hirtelen élőhely-átalakulások (pl. szélsőséges események, gradációk következtében) lefolyásának, hátterének, összefüggéseinek feltárása (reaktív kutatás) (*),
- (4) Komplex Szenárió-elemzések és döntéstámogató rendszerek készítése a leginkább veszélyeztetett élőhelyekre, tájegységekre:
- a klímaváltozás mellett a tájhasználat lehetséges alakulásait és más tényezőket is magába foglaló komplex Szenárió-elemzések készítése hazánk természetvédelmi szempontból fontos, társadalmi-gazdasági konfliktusokkal terhes tájegységeire, és jellemző vagy értékes élőhelytípusaira (*).
 - multiszektoriális döntéstámogató rendszer(ek) kialakítása a komplex Szenárió-elemzések eredményei alapján (*).
- (5) A természetvédelem jelenlegi eszközeinek és módszereinek áttekintése, javaslatok kidolgozása az esetleges módosításokra a klímaváltozáshoz való adaptáció érdekében
- A különböző védettségi státuszú területek, valamint a Nemzeti Ökológiai Hálózat értékelése éghajlat-változási szempontból, konfliktuspontok azonosítása, szakmailag megalapozott javaslatok kidolgozása az esetleges továbbfejlesztéshez
 - a kockázatok, veszélyeztetettségek és adaptációs cselekvési tervek kidolgozása a védett területekre, természeti értékekre, restaurációs és kezelési javaslatok készítése a legfontosabb kockázati és konfliktus-területekre (*),
 - mitigációs javaslatok kidolgozása a potenciálisan veszélyes adventívek megelőző megfékezésére (*+),
 - egy, a védett területeken túlterjedő ökológiai hálózat kialakítási lehetőségeinek áttekintése, a gazdálkodásban ökológiai szempontokat figyelembevevő szabályozó-rendszerek kidolgozása, az agrár-környezetvédelmi program éghajlat-változási-ökológiai szempontból való továbbfejlesztése (*).

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki a szakértői anyag elkészítésében nyújtott hathatós segítségükért és tanácsaikért a természetvédelem alábbi szakembereinek:

Haraszthy László KvVM, Érdiné Dr. Szekeres Rozália KvVM, Kissné Dr. Fodor Lívია KvVM, Ambrus András FHNPI, Dévényi Borbála DDNPI, Halupka Gábor DINPI, Molnár Attila HNPI, Dr. Nagy Lajos BINPI, Óvári Miklós BINPI, Peimlí Piroska FHNPI, Sallainé Kapocsi Judit KMNPI, Sulyok József BNPI, Szentirmai István ÖNPI, Vajda Zoltán KNPI.

Irodalomjegyzék

- Ahas, R., Aasa, A., Menzel, A., Fedotova, V. G. & Scheifinger, H. (2002): Changes in European spring phenology. – *Int. J. Climatol.* **22**:1727–1738.
- Araujo, M. B., Cabeza, M., Thuiller, W., Hannah, H. & Williams, P. H. (2004): Would climate change drive species out of reserves? An assessment of existing reserve-selection methods. – *Global Change Biology* **10**: 1618–1626.
- Araujo, M. B., Pearson, R. G., Thuiller, W. & Erhard, M. (2005): Validation of species–climate impact models under climate change. – *Global Change Biology* **11**: 1504–1513.
- Araujo, M. B. & Rahbek, C. (2006): How does climate change affect biodiversity? – *Science* **313**: 1396–1397.
- Bartholy, J., Pongrácz, R. & Gelybó, Gy. (2007): Regional climate change expected in Hungary for 2071–2100. – *Applied Ecology and Environmental Research*, **5**:1–17.
- Bazzaz, F. A. (1998): *Plants in changing environments. Linking physiological, population and community ecology.* – Cambridge University Press.
- Beerling, D. J. & Kelly, C. K. (1997): Stomatal density responses of temperate woodland plants over the past seven decades of CO₂ increase: A comparison of Salisbury 1927: with contemporary data. – *Am. J. Bot.* **84**: 1572–1583.
- Briffa, K. R., Schweingruber, F. H., Jones, P. D., Osborn, T. J., Harris, I. C., Shiyatov, S. G., Vaganov, E. A. & Grudd, H. (1998): Trees tell of past climates: but are they speaking less clearly today? – *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. B–Biol. Sci.* **353**: 65–73.
- Cain, M. L., Milligan, B. G. & Strand, A. E. (2000): Long–distance seed dispersal in plant populations. – *Am. J. Bot.* **87**: 1217–1227.
- Cain, M. L., Nathan, R. & Levin, S. A. (2003): Long–distance dispersal. – *Ecology* **84**: 1943–1944.
- Cannell, M. G. R., Thornley, J. H. M., Mobbs, D. C. & Friend, A. D. (1998): UK conifer forests may be growing faster in response to increased N deposition, atmospheric CO₂ and temperature. – *Forestry* **71**: 277–296.
- CBD (2006): *Guidance for Promoting Synergy Among Activities Addressing Biological Diversity, Desertification, Land Degradation and Climate Change.* Montreal – Secretariat of the Convention on Biological Diversity *Technical Series No.25.* IV+43 pages.
- Ciais, Ph., Reichstein, M., Viovy, N., Gramier, A., Ogee, J., Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Bernhofer, Chr., Carrara, A., Chevallier, F., De Noblet, N., Friend, A. D., Friedlingstein, P., Grünwald, T., Heinesch, B., Keronen, P., Knohl, A., Krinner, G., Loustau, D., Manca, G., Matteucci, G., Miglietta, F., Ourcival, J. M., Papale, D., Pilegaard, K., Rambal, S., Seufert, G., Soussana, J. F., Sanz, M. J., Schulze, E. D., Vesala, T. & Valentini, R. (2005): Europe–wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. – *Nature* **437**: 529–533.
- Collingham, Y. C. & Huntley, B. (2000): Impacts of habitat fragmentation and patch size upon migration rates. – *Ecol. Appl.* **10**: 131–144.
- 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 den Belt, M. (1997): The value of the world's ecosystem services and natural capital. – *Nature* **387**: 253–260.
- Csóka, Gy., Koltay, A. & Hirka, A. 2006: Klimatikus anomáliák hatása a magyarországi bükkösök és kocsánytalan tölgyesek egészségi állapotára. – *MMT XXXI. Vándorgyűlése és az V.Erdő és Klíma Konferencia előadáskivonatok.* MMT Budapest, p.61.

- Cuevas, J. G. (2002): Episodic regeneration at the *Nothofagus pumilio* alpine timberline in Tierra del Fuego. – *Chile. J. Eco.* **90**: 52–60.
- Davies, K. F., Margules, C. R. & Lawrence, J. F. (2000): Which traits of species predict population declines in experimental forest fragments? – *Ecology* **81**: 1450–1461.
- DEFRA (2006): Working with the grain of nature – taking it forward: Volume I. Full report on progress under the England Biodiversity Strategy 2002 – 2006. – www.defra.gov.uk
- De Groot, R. S., Ketner, P. & Ovaa, A. H. (1995): Selection and use of bio-indicators to assess the possible effects of climate change in Europe. – *Journal of Biogeography* **22**: 935–943.
- Fekete, G. & Varga, Z. (szerk.) (2006): *Magyarország tájainak növényzete és állatvilága*. MTA Társadalomkutatási Központ, Budapest, pp. 461.
- Gálhidy, L., Czúcz, B. & Torre, F. (2006): Zonal forest types, climatic variables and effect of changes for Hungary. – *Lesnicky casopis – Forestry Journal* **52**(1–2): 99–105.
- Geertsema, W., Opdam, P. & Kropff, M. J. (2002): Plant strategies in agricultural landscapes: survival in spatially and temporally fragmented habitat. – *Landsc. Ecol.* **17**: 263–279.
- Grace, J. (1987): Climatic tolerance and distribution of plants. – *New Phytol.* **106**: 113–130.
- Greene, D. F., & Johnson, E. A. (1995): Long-distance wind dispersal of tree seeds. – *Can. J. Bot.–Rev. Can. Bot.* **73**: 1036–1045.
- Grime, J. P., Bown V. K., Thompson, K. et al. (2000): The response of two contrasting limestone grasslands to simulated climate change. – *Science* **289**: 762–765.
- Hallett, T. B., Coulson, T., Pilkington, J. G., Clutton-Brock, T. H., Pemberton, J. M. & Grenfell, B. (2004): Why large-scale climate indices seem to predict ecological processes better than local weather. – *Nature* **430**: 71–75.
- Hickling, R., Roy, D. B., Hill, J. K. & Thomas, Ch. D. (2005): A northward shift of range margins in British Odonata. – *Global Change Biology* **11**: 502–506.
- Hinckley, D. & Tierney, D. E. (1991): Ecosystem responses to rapid climate change – past and future. *Background paper to symposium on 'Impacts of Climate Change on Ecosystems and Species'*, organized by IUCN, RIVM, US-EPA and WWF International, 2–6. Dec. 1991, Amersfoort, Hollandia
- Hoegh-Guldberg, O., Hughes, L., McIntyre, S., Lindenmayer, D. B., Parmesan, C., Possingham, H. P. & Thomas, C. D. (2008): Assisted Colonization and Rapid Climate Change. *Science* – **321**: 345–346.
- Hughes, L. (2000): Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? – *Trends in Ecology and Evolution* **15**: 56–61.
- Hunter, M. (2007): Climate Change and Moving Species: Furthering the Debate on Assisted Colonization. – *Conserv. Biol.* – **21**: 1356–1358.
- Huntley, B. & Birks, H. J. B. (1983): *An atlas of past and present pollen maps for Europe: 0–13000 B.P.* Cambridge University Press, Cambridge
- IPCC 2001: *Climate Change 2001: Synthesis Report* – Cambridge University Press.
- IPCC 2007: *Climate Change 2007: Synthesis Report* – IPCC, Geneva, Switzerland.
- Kalapos, T., Lellei-Kovács, E., Mojzes, A., Barabás, S. & Kovács-Láng, E. (2006): Ökoszisztéma válaszok egy klímaszimulációs ökológiai terep kísérletben a Duna–Tisza közén II. A talajlégzés és a növényi anyagcsere működésének módosulása. – *VAHAVA Zárókonferencia*, 2006.március 9. Poszter.
- Kovács-Láng, E., Kröel-Dulay, Gy., Kertész, M., Fekete, G., Bartha, S., Mika, J., Dobi-Wantuch, I., Rédei, T., Rajkai, K. & Hahn, I. (2000): Changes in the composition of sand grasslands along a climatic gradient in Hungary and implications for climate change. – *Phytocoenologia* **30**: 385–407.
- Kovács-Láng, E., Kröel-Dulay, Gy., Lhotsky, B. & Garadnai, J. (2002): A klímaváltozás ökológiai hatásainak vizsgálata a magyarországi homoki erdőssztyepp biomban. – In: Salamon-Albert, É.(szerk.) *Magyar botanikai kutatások az ezredfordulón*. – Pécsi Tud. Egy. Növénytan Tanszéke, Pécs, pp. 571–580.
- Kovácsné Láng, E., Kröel-Dulay, Gy. & Rédei, T. (2005): A klímaváltozás hatása a természetközeli erdőssztyepp ökoszisztémákra. – *Magyar Tudomány* **7**: 812–817.
- Kovács-Láng, E., Kröel-Dulay, Gy., Rédei, T., Lhotsky, B. & Garadnai, J. (2006a): The effect of climate change on forest–steppe ecosystems in the Carpathian Basin. – In: Láng, I., Faragó, T., Iványi, Zs.(eds.): *Proceedings of the International Conference on Climate Change, Impacts and responses in Central and Eastern European Countries*, 5–8. november, 2005. Pécs, HAS-REC-MEW, pp.294–300.

- Kovács-Láng, E., Kröel-Dulay, Gy., Garadnai, J., Barabás, S., Lhotsky, B. & Lellei-Kovács, E. (2006b): Ökoszisztéma válaszok egy klímaszimulációs ökológiai terepkiérletben a Duna-Tisza közén I. A növényzet tömegviszonyainak alakulása. – *VAHAVA Zárókonferencia*, 2006. március 9. Poszter.
- Kozár, F., Szentkirályi, F., Kádár, F. & Bernáth, B. (2004): Éghajlatváltozás és a rovarok. – *AGRO-21 Füzetek* **33**: 49–64.
- Kozár, F., Szentkirályi, F., Nagy, B., Kádár, F., Bernáth, B. & Szócs, G. (2006): Klímaváltozás és a rovarok: Milyen további veszélyek várhatók? – *VAHAVA Zárókonferencia*, 2006. március 9. Poszter.
- Kröel-Dulay, Gy., Kovács-Láng, E., Rédei, T., Garadnai, J., Lhotsky, B., Czúcz, B. & Kucs, P. (2006): Aszály okozta pusztulás és regeneráció homokpusztagepekben a Duna-Tisza közén. – *VAHAVA Zárókonferencia*, 2006. március 9. Poszter.
- Kullman, L. (2001): 20th century climate warming and tree-limit rise in the Southern Scandes of Sweden. – *Ambio* **30**: 72–80.
- Kullman, L. (2002): Rapid recent range-margin rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes. – *J. Ecol.* **90**: 68–77.
- Lane, D. R., Coffin, D. P. & Lauenroth, W. K. (2000): Changes in grassland canopy structure across a precipitation gradient. – *Journal of Vegetation Science* **11**: 359–368.
- Lehto, T. E. (2003): The number of Lepidoptera species new to Finland is growing. – *Baptria* **28**: 16–22.
- Lövei, G. L. (1997): Biodiversity – Global change through invasion. – *Nature* **388**: 627–628.
- McLachlan, J. S., Hellmann, J. J., & Schwartz, M. W. (2007): A framework for debate of assisted migration in an era of climate change. *Conserv. Biol.* – **21**: 297–302.
- Mátyás, Cs. (2004): A természetes növénytakaró, az erdő klímaérzékenysége. – *Természet Világa* **135**. évf. II. Különszám pp.70–73.
- Mátyás, Cs. & Czímber, K. (2000): Zonális erdőtakaró mezoklímaszintű modellezése: lehetőségek a klímaváltozás hatásainak előrejelzésére. – In: *III. Erdő és Klíma Konferencia*. Debrecen, 2000. jún. 7–9. DE TTK Meteorológiai Tanszék, pp. 83–97.
- Mátyás, Cs. & Czímber, K. (2002): Az előrejelzett klímaváltozás és a magyar erdőtakaró sorsa. – *NYME EMK Tud. Konf. Előadások* 2001: Sopron, pp. 67–74.
- Menzel, A. (2000): Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. – *Int. J. Biometeorol.* **44**: 76–81.
- Menzel, A. & Fabian, P. (1999): Growing season extended in Europe. – *Nature* **397**: 659.
- Menzel, A., Jakobi, G., Ahas, R., Scheifinger, H. & Estrella, N. (2003): Variations of the climatological growing season (1951–2000) in Germany compared with other countries. – *Int. J. Climatol.* **23**: 793–812.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment) (2005): *Ecosystems and Human Well-being: General Synthesis* – www.millenniumassessment.org
- Miller, C. & Urban, D. L. (1999): A model of surface fire, climate and forest pattern in the Sierra Nevada, California. – *Ecol. Model* **114**: 113–135.
- Morecroft, M. D., Masters, G. J., Brown, K. V., Clarke, I. P., Taylor, M. E. & Whitehouse, A. T. (2004): Changing precipitation patterns alter plant community dynamics and succession in an ex-arable grassland. – *Functional Ecology* **18**: 648–655.
- Myneni, R. B., Keeling, C. D., Tucker, C. J., Asrar, G. & Nemani, R. R. (1997): Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. – *Nature* **386**: 698–702.
- Nathan, R., Perry, G., Cronin, J. T., Strand, A. E. & Cain, M. L. (2003): Methods for estimating long-distance dispersal. – *Oikos* **103**: 261–273.
- Noss, R. F. (2001): Beyond Kyoto: Forest management in a time of rapid climate change. – *Conservation Biology* **15**: 578–590.
- Parmesan, C. (1996): Climate and species range. – *Nature* **382**: 765–766.
- Parmesan, C., Ryrholm, N., Stefanescu, C., Hill, J. K., Thomas, C. D., Descimon, H., Huntley, B., Kaila, L., Kullberg, J., Tammaru, T., Tennent, W. J., Thomas, J. A. & Warren, M. (1999): Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. – *Nature* **399**: 579–583.
- Parmesan, C., Root, T. & Willig, M. R. (2000): Impacts of Extreme Weather and Climate on Terrestrial Biota. – *Bull. of the Am. Met. Soc.* **81.3**: 443–450.
- Parmesan, C. & Yohe, G. (2003): A globally coherent fingerprint of climate change Impacts across natural systems. – *Nature* **421**: 37–42.

- Penuelas, J., Prieto, P., Beier, C., Cesaraccio, C., De Angelis, P., de Dato, G., Emmett, B. A., Estiarte, M., Gorissen, A., Kovács-Láng, E., Kröel-Dulay, Gy., Garadnai, J., Llorens, L., Pellizzaro, G., Riis-Nielsen, T., Schmidt, I. K., Sirca, C., Sowerby, A., Spano, D. & Tietema, A. (2007): Response of plant species richness and primary productivity in shrublands along a north-south gradient in Europe to seven years experimental warming and drought. Reductions in primary productivity in the heat and drought year of 2003. – *Global Change Biology* **13**: 2563–2581.
- Peterson, D. L. (1994): Recent changes in the growth and establishment of subalpine conifers in western North America. – In: Beniston, M. (ed.) *Mountain Environments in changing Climates*. Routledge, pp. 234–243.
- Peterson, T. A. (2003): Projected climate change effects on Rocky Mountain and Great Plains birds: generalities of biodiversity consequences. – *Global Change Biology* **9**: 647–655.
- Phillips, O. L., Malhi, Y., Higuchi, N., Laurance, W. F., Nunez, P. V., Vasquez, R. M., Laurance, S. G., Ferreira, L. V., Stern, M., Brown, S. & Grace, J. (1998): Changes in the carbon balance of tropical forests: Evidence from long-term plots. – *Science* **282**: 439–442.
- Pöyry, J., Toivonen, H. (2005): Climate change adaptation and biological diversity. – *FINADAPT Working Paper 3*. Finnish Environment Institute Mimeographs 333. Helsinki, 46 pp.
- Salisbury, E. J. (1926): The geographical distribution of plants in relation to climate factors. – *Geogr. J.* **57**: 312–335.
- Scheffinger, H., Menzel, A., Koch, E., Peter, C. & Ahas, R. (2002): Atmospheric mechanisms governing the spatial and temporal variability of phenological phases in central Europe. – *Int. J. Climatol.* **22**: 1739–1755.
- Schneider, S. H. & Root, T. L. (2001): Climate Change and Ecology. – In: Levin, S.A. (ed) *Encyclopedia of Biodiversity Vol 1*. Academic Press, Boston, New-York, London, pp. 709–725.
- Schröter, D. (2005): Vulnerability to Changes in Ecosystem Services. CID Graduate Student and Postdoctoral Fellow Working Paper No. 10. Cambridge, MA: Science, Environment and Development Group, Center for International Development, Harvard University.
- Scott, D. & Lemieux, C. J. (2003): Vegetation Response to Climate Change: Implications for Canada's Conservation Lands. – *Environment Canada*, Toronto, pp. 38.
- Shaver, G. R., Canadell, J., Chapin III, F. S., Gurevitch, J., Harte, J., Henry, G., Ineson, P., Jonasson, S., Melillo, J., Pitelka, L. & Rustad, L. (2000): Global warming and terrestrial ecosystems: a conceptual framework for analysis. – *BioScience* **50**(10): 871–882.
- Smith, R. I. L. (1994): Vascular plants as bioindicators of regional warming in Antarctica. – *Oecologia* **99**: 322–328.
- Solymosi, P. (1992): Meghonosodott és újabban behurcolt jövevény (adventív) növények Magyarországon. – *Növényvédelem* **28**: 9–20.
- Stern Review (2006): The Economics of Climate Change. http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/stern_review_report.cfm
- Sturm, M., Racine, C. & Tape, K. (2001): Climate change Increasing shrub abundance in the Arctic. – *Nature* **411**: 546–547.
- Swetnam, T. W. (1993): Fire history and climate change in giant sequoia groves. – *Science* **262**: 885–889.
- Sykes, M. T. & Haxeltine, A. (2001): Modeling the response of vegetation distribution and biodiversity to climate change. In: Chapin III, F.S., Sala, O., Huber –Sannwald, E. (eds.) *Global biodiversity in a changing environment, Ecological Studies 152*. Springer-Verlag, New-York, pp. 5–21.
- Thomas, C. D. & Lennon, J. J. (1999): Birds extend their ranges northward. – *Nature* **399**: 213.
- Thomas, C. D., Williams, S. E., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., Erasmus, B. F. N., de Siqueira, M. F., Grainger, A., Hannah, L., Hughes, L., Huntley, B., van Jaarsveld, A. S. L., Midgley, G. F., Miles, L., Ortega-Huerta, M. A., Peterson, A. T., Phillips, O. L., Williams, S. E. (2004): Extinction risk from climate change. – *Nature* **427**: 145–148.
- Tilman, D. (1993): Community Diversity and Succession: The Roles of Competition, Dispersal, and Habitat Modification. – In: Schulze, E.D., Mooney, H.A. (eds) *Biodiversity and Ecosystem Function*, Springer, Berlin, pp. 327–344.
- Tóth, J. A., Papp, M., Krakomperger, Zs. & Kotroczó, Zs. (2006): A klímaváltozás hatása egy cseres-tölgyes erdő struktúrájára (Sikfőkút Project). – *VAHAVA Zárókonferencia*, Poszter.

- Tuba, Z. (2003): Az emelkedő légköri CO₂ koncentráció növényökológiai hatásai. – *Agro-21 Füzetek, Klímaváltozás – Hatások – Válaszok* **32**: 110–127.
- Usher, M. B. 2005: Conserving European Biodiversity in the context of Climate Change. <CO-DBP/documents/codbp2005/codbp03erev_05 >
- Voigt, W., Perner, J., Davis, A. J., Eggers, T., Schumacher, J., Bahrmann, R., Fabian, B., Heinrich, W., Köhler, G., Lichter, D., Marstaller, R. & Sander, F. W. (2003): Trophic levels are differently sensitive to climate. – *Ecology* **84**: 2444–2453.
- Walkovszky, A. (1998): Changes in phenology of the locust tree (*Robinia pseudoacacia* L.) in Hungary. – *Int.J. Biometeorology* **1**: 155–160.
- Walther, G-R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J. C., Fromentin, J-M., Hoegh-Guldberg, O. & Bairlein, F. (2002): Ecological response to recent climate change. – *Nature* **416**: 389–395.
- Watt, A. D. & McFarlane, A. M. (2002): Will climate change have a different impact on different trophic levels? Phenological development of winter moth *Operopthera brumata* and its host plants. – *Ecological Entomology* **27**: 254–256.
- Whittaker, R. H. (1975): *Communities and Ecosystems*. – 2nd ed. Macmillan, London.
- Woodward, F. I. (1988): *Climate and plant distribution*. – Cambridge University Press, Cambridge.
- Zebisch, M., Grothmann, T., Schröter, D., Hasse, C., Fritsch, U. & Cramer, W. (2005): Climate Change in Germany, Vulnerability and adaptation of climate sensitive sectors. – *Research report 201 41 253*. UBA-FB, Potsdam
- Zhou, L. M., Tucker, C. J., Kaufmann, R. K., Slayback, D., Shabanov, N. V. & Myneni, R. B. (2001): Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. – *J. Geophys. Res.-Atmos.* **106**: 20069–20083.

The impact of climate change on natural ecosystems and the response options for nature conservation

Kovács-Láng, E., Kröel-Dulay, G. & Czúcz, B.

Institute of Ecology and Botany, HAS, 2163 Vácrátót, Hungary. E-mail: lange@botanika.hu

Abstract: The paper presented here was originally prepared as a background study for the National Climate Change Strategy of Hungary, with the aim of giving a comprehensive picture on the problems Hungarian nature conservation is about to face in a world of changing climate. By summarizing potential impact mechanisms and the pitfalls of predictions, it provides a broad overview on observed and expected changes worldwide with particular emphasis on Hungary. However, the main message of the paper is the detailed overview of the immense tasks ahead of nature conservation, including research, institutional development, and practical actions.

Keywords: climate change, nature conservation, adaptation, ecosystems

