

3. Klasifikácia a kategórie modelov lesa

Súčasný výskum poskytuje veľmi širokú paletu modelov, ktoré sa líšia nielen využitými princípmi a algoritmami, ale aj konštrukciou softvéru. Najzákladnejším rozdelením modelov je klasifikácia podľa modelovacieho konceptu (KURTH 1994) na empirické, procesné a štrukturálne modely. **Empirické modely** (i) vychádzajú zo štatistických súvislostí získaných z empirických údajov výskumných, monitorovacích alebo inventarizačných plôch. **Procesné modely** (ii) sú založené na známych kauzálnych súvislostiach v rámci ekofyziologických a ekosystémových procesov (napríklad absorpcia žiarenia, pedotransferne funkcie, hydrologická bilancia, transpirácia, vodivosť prieduchov, energetická bilancia listu, fotosyntéza, respirácia, alokácia, senescencia a podobne). **Štrukturálne modely** (iii) sa zameriavajú na vývoj morfológie stromu na základe architektúry stromu a topológie orgánov, napríklad využitím prvkov fraktálnej geometrie, rekurzívnych L-systémov a vektorovej grafiky.

Okrem tejto elementárnej klasifikácie existujú aj iné prístupy, ktoré triedia modely podľa časovo-priestorovej úrovne (PRETZSCH 2001), hierarchicko-priestorovej úrovne (LISCHKE 2001) alebo ďalšie klasifikácie podľa MUNRO (1974), SHUGART (1984), VANCLAY (1994), LIU and ASHTON (1995), HOULLIER (1995), FRANC et al. (2000), PORTÉ a Bartelink (2002) alebo PRETZSCH (2007). S popisom charakteru jednotlivých kategórií sa možno stretnúť v monografiách venovaných modelovaniu lesa, napríklad PRETZSCH (2009), WEISKITTEL (2011), BURKHART a TOMÉ (2012) alebo FABRIKA a PRETZSCH (2013). Pre účely tejto štúdie sme zvolili klasifikáciu podľa LISCHKE (2001), ktorá bola upravená v publikácii FABRIKA a PRETZSCH (2013) do takzvanej „šachovnice modelov“ a následne zjednodušená do výslednej podoby (obr. 1). Agreguje v sebe viacero klasifikácií. Je štvorrozmerná. Zohľadňuje objekt modelovania (i), priestorové rozlíšenie (ii), časové rozlíšenie (iii) a použitý koncept (iv). Typ modelu vyplýva z úrovne modelovaného objektu (orgán, organizmus, trieda/kohorta, populácia alebo ekosystém) a priestorovej úrovne (súradnice objektu v 3D priestore, horizontálne umiestnenie objektu na 2D ploche alebo príslušnosť objektu k bio-skupine, porastu či regiónu). Úroveň modelovaného objektu je zobrazená v stĺpcoch šachovnice označených písmenami gréckej abecedy, priestorová úroveň v riadkoch šachovnice označených rímskymi číslicami. Úroveň objektu je zároveň korelačne previazaná s časovým rozlíšením modelu, čo je znázornené na časovej osi pred šachovnicou. Priesečník objektovej a priestorovej úrovne definuje kategóriu modelu. Na obrázku je znázornená polohou šachovej figúrky. Farba figúrky vyjadruje prevažujúci modelovací koncept: procesný (šedá), štrukturálny (biela) alebo empirický (čierna). Kategórie sú označené arabskou číslicou a možno ich definovať nasledovne:

1) **Ekofyziologické modely stromu** (αI) modelujú kauzálne procesy (LANDSBERG a SANDS 2011), pričom základom je asimilácia v listoch alebo ihliciach jednotlivého stromu. Listy alebo ihlice môžu byť modelované samostatnými objektmi, alebo častejšie generalizovanými objektmi vo forme celých telies koruny stromu alebo jej diferencovaných vrstiev. Dôležité je umiestnenie týchto objektov v 3D priestore porastu, z ktorého vyplýva úroveň absorpcie žiarenia. Využívajú sa rôzne prístupy založené napríklad na metóde ray-tracing (BRUNNER 1998). Výsledkom produkcie je čistá biomasa, ktorá sa alokuje (prerozdeľuje) do ostatných orgánov stromu. Priekopníkom uvedeného modelovacieho princípu bol PFREUNDT (1988), ktorý ako prvý použil uvedený princíp v modelovaní lesa alebo neskôr HAUHS (HAUHS et al. 1995), ktorý predstavil model TRAGIC. Z novších modelov možno spomenúť napríklad model BALANCE (GROTE a PRETZSCH 2002) alebo model HETEROFOR od JONARDA (in LIGOT et al. 2014).

2) **Funkčno-štrukturálne modely rastlín** (αI) sa zameriavajú na modelovanie vývoja morfológie rastlín v čase a priestore. Ich základy boli položené PRUSINKIEWICZOM vychádzajúc z myšlienok LINDENMAYERA (PRUSINKIEWICZ a LINDENMAYER 1990). Princíp využíva rastové gramatiky (morfémy), ktoré rekurzívnym spôsobom definujú opakujúcu sa náhradu časti stromu novými časťami. Vznikajú vetviace sa štruktúry (graftály), ktoré sú zobrazené prostredníctvom vektorovej (korytnačej) grafiky. Ich pôvod je teda vo fraktálnej geometrii a takzvaných L-systémoch. Tvar a veľkosť nových štruktúr rastliny sú zároveň usmerňované výkonom ekofyziologických procesov, najmä fotosyntézy, ktoré sú zabudované priamo do rastových gramatík. Príkladom môžu byť produkty GROGRA (KURTH 1999), LIGNUM (PERTTUNEN et al. 1998) alebo GroIMP (KNIEMEYER 2008).

3) **Modely big leaf** (αV) generalizujú asimilačné orgány do abstraktného listu, ktorý reprezentuje zvolenú priestorovú jednotku ekosystému, napríklad 1 m^3 . Výkon asimilácie abstraktného listu je zhodný s výkonom modelovaného ekosystému v priestorovej jednotke. Zároveň sa predpokladá, že priestorová jednotka je svojim zápojom homogénna a vyjadruje určitý typ vegetácie. Absorpcia žiarenia sa potom rieši na základe indexu listovej plochy homogénneho zápoja, napríklad pomocou Lambert-Beerovho zákona niekedy doplneného Campbellovou metódou elipsoidnej orientácie asimilačných orgánov (CAMPBELL 1986, 1990). Medzi zakladateľov princípu patria modely 3-PG (LANDSBERG a WARING 1997) alebo Biome-BGC (THORNTON 1998).

4) **Distančné závislé (priestorovo explicitné) empirické stromové modely** (βII) vychádzajú z empirických súvislosti medzi prírastkom stromov (hrúbkovým a výškovým), podmienkami prostredia (napríklad bonita porastu alebo súbor stanovištných charakteristík) a konkurenčným tlakom na strom. Konkurenčný tlak je modelovaný pomocou konkurenčných indexov závislých na umiestnení a rozmeroch okolitých stromov. Základy prístupu boli položené modelom FOREST (EK a MONSERUD 1974). Z novších modelov možno spomenúť napríklad modely SILVA (PRETZSCH et al. 2002) alebo SIBYLA (FABRIKA 2007).

5) **Distančne nezávislé (priestorovo neexplicitné) empirické stromové modely** (βIV) sú modely podobného charakteru, ale pre modelovanie konkurencie nie sú potrebné pozície stromov. Konkurenčný tlak vychádza z celkovej plochy (zápoj alebo hustota) alebo z pozície stromu v rámci distribučnej krivky zvolenej biometrickej charakteristiky. Tento zjednodušený postup modelovania konkurencie bol predstavený v modeli STAND PROGNOSIS MODEL od WYKOFFA et al. (1982). Z neskorších modelov možno spomenúť produkty PROGNAUS (STERBA 1995) alebo BWIN (NAGEL 1996).

6) **Stromové gap modely** (βIII) rozdeľujú záujmové územie na bioskupiny stromov (napr. 100 až 1000 m^2). Zameriavajú sa na modelovanie rastu jednotlivých stromov v bioskupinách. Biometrické veličiny stromov (hrúbky, výšky) v skupinách sú známe. Pozície stromov sa neberú do úvahy, avšak pozície bioskupín sú dôležité, pretože definujú dynamiku vegetácie (sukcesie) v modelovanom území. Medzi priekopníkov tohto princípu modelovania patria BOTKIN et al. (1972) modelom JABOWA a SHUGART a WEST (1977) modelom FORET. Z novších produktov možno spomenúť napríklad model PICUS (LEXER a HOENNINGER 2001).

7) **Kohortné gap modely** (γIII) vznikli pričinením BUGMANNA (1994), ktorý dokázal, že stromy, ktoré sú podobné na začiatku simulácie, zostávajú podobnými celý svoj život. Preto rozdelil stromy v bioskupinách do takzvaných kohort, ktoré predstavujú generácie stromov diferencované svojou charakteristickou výškou. Kohorty sú reprezentované jedným typickým jedincom a počtom stromov

v kohortách. Stromy nemenia svoju príslušnosť do kohorty. Môže dochádzať iba k redukcii počtu jedincov v kohorte pod vplyvom mortality. Modeluje sa iba rast typického stromu v kohorte, čím sa šetrí výpočtový čas bez výrazného vplyvu na výsledky simulácie. Svoj prístup predstavil v modeli ForClim (BUGMANN 1996).

8) **Frekvenčné porastové modely** (γ IV) sa zaoberajú dynamikou rozdelenia početností zvolenej biometrickej veličiny. Vytvárajú sa triedy danej veličiny, napríklad hrúbkové triedy. Pomocou modelovania zmeny frekvencie tried sa modeluje dynamika rastu lesa v čase. Triedy sa nemenia, mení sa len príslušnosť stromov do tried. Tým sa odlišujú od predchádzajúcej skupiny, kde ako triedy vystupovali kohorty, ktorých veľkosť sa menila alebo príslušnosť stromov do kohorty bola nemenná. V tejto kategórii modelov triedy rozdeľujú celý lesný porast. Predchádzajúca kategória modelov rozdeľovala na kohorty bioskupiny stromov. Ako príklad frekvenčných modelov uvádzame modely CLUTERA (1963), VON GADOWA (1987), SUZUKIHO (1971) a SLOBODU (1976).

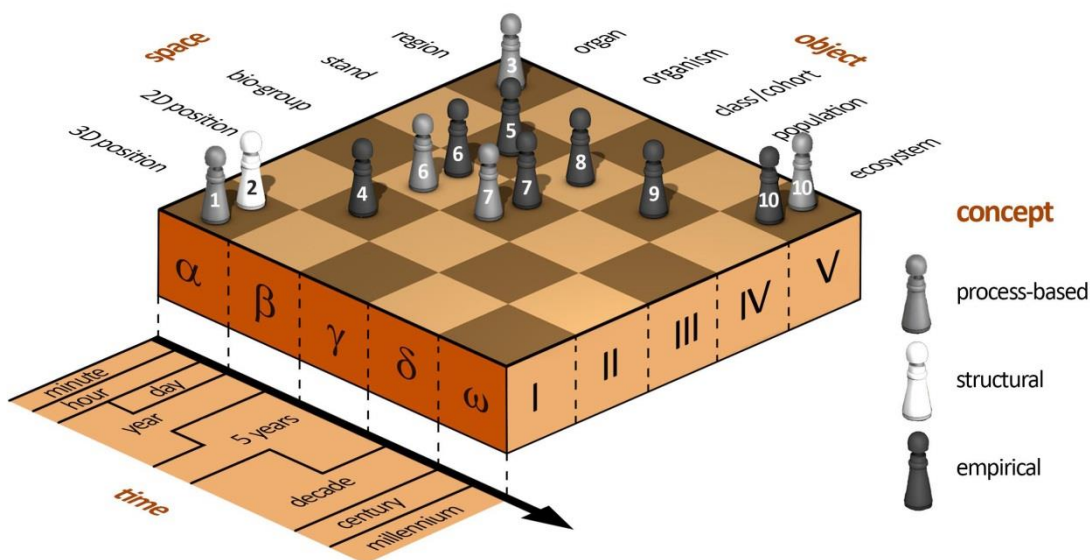
9) **Populačné (druhovú) porastové modely** (δ IV) patria medzi najtradičnejšie modely. Ich počiatky siahajú k rastovým tabuľkám (ASSMANN a FRANZ 1963, HAMILTON a CHRISTIE 1973, VUOKILA 1966, SCHMIDT 1971, LEMBCKE et al. 1975, HALAJ et al. 1987). Modelujú vývoj stredných a plošných porastových veličín (napríklad stredné hrúbky, stredné výšky a zásoby) na základe typu stanovišťa. Pre vývoj sa využívajú výhradne empirické regresné modely veľmi často založené na rastových funkciách. Modely majú obmedzenú platnosť (modelový typ porastu, modelová hustota porastu, modelový režim obhospodarovania lesa). Sú viazané na celú populáciu alebo druh v lesnom poraste. Medzi flexibilnejšie modely tohto typu možno zaradiť model STAOET (FRANZ 1968) a DFIT (BRUCE et al. 1977).

10) **Biómové modely** (ω V) predpokladajú, že so zmenou podmienok prostredia (napríklad úrovňou teplôt a zrážok) sa mení aj zloženie vegetácie (biómy). Zameriavajú sa na zmeny klimaxových vegetačných typov v dlhých časových periódach (storočia až tisícročia). Prvým a dnes už klasickým zástupcom je model podľa HOLDRIDGEA (1947). Z novších sú to napríklad modely BIOME (PRENTICE et al. 1972) alebo DOLY (WOODWARD a SMITH 1994).

Predloženú klasifikáciu možno považovať za univerzálnu vzhľadom na jej viacrozmerný charakter (objekt, čas, priestor, koncept). Uvedených 10 kategórii modelov možno v súčasnosti považovať za základ, od ktorého sa odvíjajú ďalšie možné modifikácie. Pozícia typov na „šachovnici modelov“ je vyznačená ich typickým postavením, niektoré varianty sa však nemusia vyskytovať na typickej pozícii. Napríklad modely typu big leaf sa obvykle používajú na regionálnej úrovni vegetačných typov (Biome-BGC od THORNTONA 1998, pozícia α V), ale môžu byť úspešne uplatnené aj na úrovni porastov (Forest-BGC od RUNNINGA a GOWERA 1991, pozícia α IV). Rovnako to platí aj pre farbu figúrky na „šachovnici modelov“, ktorá vyjadruje koncept modelovania. V klasifikácii bol zvolený koncept, ktorý pri danom type modelov prevláda. Avšak niektoré varianty využívajú aj iné koncepty. Napríklad model ANAFORE od DECKMYNA et al. (2008) modeluje zmenu typických jedincov patriacich do kohort (objekt modelovania) na úrovni porastu (priestorové rozlíšenie) s využitím procesného konceptu modelovania. Ide teda o kategóriu γ IV, ktorá bola pôvodne vytvorená pre empirické modely a statické triedy a nie pre procesné modely a dynamické kohorty. Podobným príkladom je model GOTILWA (GRACIA et al. 1999), ktorý patrí do tej istej kategórie ako model ANAFORE avšak namiesto kohort využíva pôvodný princíp delenia populácie do pevne zvolených hrúbkových tried. Takisto využíva modelovanie vývoja typického jedinca v hrúbkovej triede s využitím procesného konceptu.

Súčasný trend je v **hybridizácii** modelov. Hybridné modely využívajú viacero kategórií modelov súčasne. Tie sa vzájomne dopĺňajú, to znamená že ich algoritmy sú vzájomne previazané. Trendom sú aj postupy typu **downscale** alebo **upscale**, ktoré umožňujú prechádzať sériovým prístupom zo všeobecnejšej úrovne modelovania na detailnejšiu úroveň (downscale) alebo opačne z detailnejšej úrovne na všeobecnejšiu úroveň (upscale). Druhý postup je v literatúre častejší (pozri práce KING 1991, RASTETTER et al. 1992, BUGMANN et al. 2000, DIECKMANN et al. 2000, AUGER a LETT 2003, URBAN 2005, LISCHKE et al. 2006). Okrem toho je možné využívať aj paralelný prístup typu **multiscaling**, keď jeden produkt paralelne využíva viacero typov vzájomne nepreviazaných modelov, ktoré sa volia v závislosti od účelu simulácie, ako je to napríklad v aktuálnej verzii modelu SIBYLA (FABRIKA 2014).

„Šachovnica modelov“ nie je len univerzálna, ale je zároveň aj otvorená. To znamená, že ak sa vo vede alebo praxi prejaví potreba novej kategórie modelov, tak sa políčko klasifikácie vyplní novou figúrkou príslušnej farby. Podobný princíp prebiehal aj počas doterajšieho vývoja modelov lesa. Napríklad ako prvá pozícia (δIV) bola vyplnená rastovými tabuľkami a zatiaľ ako posledná pozícia (αI) bola obsadená ekofyziologickými modelmi stromu a funkčno-štrukturálnymi modelmi rastlín.



Obr.1. Klasifikácia modelov podľa objektu, priestoru, času a konceptu. Klasifikácia doteraz definuje 10 kategórií modelov: ekofyziologické modely stromu (1), funkčno-štrukturálne modely rastlín (2), modely big leaf (3), distančne závislé (priestorovo explicitné) empirické stromové modely (4), distančne nezávislé (priestorovo neexplicitné) empirické stromové modely (5), stromové gap modely (6), kohortné gap modely (7), frekvenčné porastové modely (8), populačné (druhovú) porastové modely (9) a biómové modely (10). Pozícia figúrky na šachovnici zatrieduje kategóriu na základe objektu modelovania a priestorového rozlíšenia. Časové rozlíšenie je korelačne zviazané s objektom modelovania. Farba figúrky definuje prevládajúci koncept. Budúcnosť vývoja môže priniesť zaplnenie aj ďalších pozícií na „šachovnici modelov“.