

EKOLOGICKÁ BONITÁCIA V MODELI RASTU LESA SIBYLA NA PODKLADE KLIMATICKÝCH A PÔDNYCH CHARAKTERISTÍK

ECOLOGICAL SITE CLASSIFICATION IN FOREST GROWTH MODEL SIBYLA ON BASIS OF CLIMATIC AND SOIL VALUES

Marek Fabrika

Technická univerzita vo Zvolene

Abstract

The paper presents model of ecological site classification for forest stands (spruce, fir, pine, beech, oak). The model is based on principle of SILVA 2.2 modelling. The model is composed from: selection of site values influenced to height and diameter increment (transformation and aggregation functions), model of production ranges for tree increments and model of climate regionalisation. The result of the model is algorithms and software solution, which allows estimate diameter and height increment potential on basis of climatic and soil inputs. The software unit is integrated into growth simulator SIBYLA and serves for forest growth prognosis regarding to different climatic scenarios.

Keywords: growth modelling, growth simulator, growth potential, climatic value influence, climate regionalisation

Úvod

V lesnícky vyspelých európskych krajinách je v modelovaní rastu lesa badať prechod od porastových modelov založených na vývoji stredných a plošných charakteristík lesa k stromovým modelom, ktoré zohľadňujú konkurenčné vzťahy, mortalitu, rôzne výchovné programy a sú úzko previazané s kvalitou stanovišťa a s klimatickými charakteristikami. Modely dosahujú detailnejšiu úroveň modelovania a sú flexibilnejšie, hlavne z hľadiska univerzálnosti ich použitia. Poskytujú možnosť modelovať nielen rovnorodé rovnoveké porasty pre statické prebierkové režimy a bonitáciu, ale aj zmiešané rôznoveké porasty s dynamickými prebierkovými režimami a ekologickou bonitáciou pomocou klimatických a pôdnych charakteristík. Okrem širokej palety vstupných údajov, modely disponujú aj bohatým rozsahom výstupných údajov, ktoré pokrývajú nielen produkciu lesa, ale aj ekologické a ekonomické charakteristiky. Táto povaha ich predurčuje ako nástroj pre strategické plánovanie a multikriteriálne rozhodovanie pri obhospodarovaní rizík v lesných ekosystémoch. Šírka vstupov a výstupov, ako aj komplexnosť a zložitnosť modelov vyžaduje, aby ich riešenie nebolo aplikované len prostredníctvom súboru matematických rovníc alebo tabuľkových prehľadov, ale

pomocou štrukturovaných počítačových programov. Bohatá tradícia, silné modelové zázemie a kvalitné stromové rastové simulátory vrátane softwarových produktov (SILVA, MOSES, PROGNAUS, BWIN, STAND) sú hlavne v nemecky hovoriacich krajinách a Škandinávii (PRETZSCH 1992, HASENAUER 1994, STERBA 1995, NAGEL 1996, PUKKALA-MIINA 1997).

Nevyhnutnou zložkou stromového rastového modelu je systém matematických rovníc na modelovanie prírastku stromových veličín (hrúbky, výšky, prípadne korunových parametrov). Mnohé z týchto modelov sú založené na bonitácií porastu priamo cez klimatické a pôdne faktory. Takejto bonitácií hovoríme **ekologické bonitácia**, a má nesmierny význam v tom, že umožňuje sledovať vplyv stanovištných rastových faktorov na rast stromov a porastov, čo doteraz používané rastové modely (napríklad rastové tabuľky) neumožňujú. Nevýhodou takéhoto modelu je fáza jeho vývoja, pretože je veľmi náročný na drahý empirický materiál a zložité modelovacie techniky pri jeho odvodzovaní.

Cieľom príspevku je predložiť riešenie ekologickej bonitácie v rastovom modeli SIBYLA, ktoré vzniklo v rámci riešenia medzinárodného vedeckého projektu 5. rámcového programu Európskej únie s názvom: „Implementing Tree Growth Models as Forest Management Tools“ číslo QLRT 1999-31349. Jedným z cieľov projektu bolo vytvoriť algoritmické a programové riešenie rastového simulátora prispôbeného pre slovenské produkčné podmienky. Prvým nevyhnutným predpokladom bolo vytvorenie systému ekologickej bonitácie hlavných drevín, ktorý na Slovensku doposiaľ neexistoval. V rámci uvedeného bolo potrebné riešiť nasledujúce úlohy:

- odvodiť hlavné klimatické a pôdne faktory, tzv. *stanovištné premenné* (s_i) o rozsahu n , ktoré majú signifikantný vplyv na rast hrúbky a výšky stromu,

- kvantifikovať oddelený vplyv týchto faktorov (r_i) na prírastok hrúbky a výšky vo forme *transformačných funkcií*:

$$r_i = f(s_i); i = 1..n; r_i \in \langle 0,1 \rangle \quad (1)$$

- odvodiť komplexný vplyv týchto faktorov s_i na základe agregovania oddelených vplyvov r_i do celkového vplyvu r pomocou *agregačných funkcií*,

- odvodiť produkčné rámce pre rast hrúbky a výšky stromu (minimálna a maximálna úroveň pri ekologickom optimu a pesimu),

- vytvoriť model na regionalizáciu klimatických a pôdnych charakteristík a ich odvodenie z bežne dostupných informácií lesníckej prevádzky,

- vytvoriť softwarové riešenie ekologickej bonitácie a implementovať ho do rastového simulátora SIBYLA.

Materiál

Pozadím pre odvodenie modelu ekologickej bonitácie je modelovací princíp a algoritmus rastového simulátora SILVA 2.2 (PRETZSCH 1992, KAHN 1994), ktorý je výsledkom výskumného tímu z Technickej univerzity v Mníchove (PRETZSCH, KAHN, BIEBER, POMMERENNING, SEIFERT). Voľba modelu spočívala na fakte, že uvedený model patrí na území Európy v ekologickej bonitácii medzi najprepracovanejšie a rovnako aj fakt, že na jeho vývoji sa podieľali aj členovia riešiteľského tímu z Technickej univerzity vo Zvolene (ĎURSKÝ, FABRIKA). S ohľadom na nedostatok empirických údajov pre odvodenie niektorých častí modelu, boli tieto kompletne prevzaté z modelu SILVA 2.2. Jedná sa o riešenie prvých troch bodov v rámci úloh uvedených v predchádzajúcom texte (voľba stanovištných premenných, odvodenie transformačných a agregáčnych funkcií). Pre ostatné súčasti modelu bol k dispozícii dátový materiál a preto boli odvodené nové algoritmy na princípe modelu KAHNA (1994).

Dátovú základňu pre odvodenie modelu SIBYLA tvorí široká paleta zdrojových údajov, ktorú možno rozdeliť na zahraničnú a domácu:

1. Základom pre parametrizáciu modelov funkcií vplyvu klimatických a pôdnych faktorov na prírastok bola sieť dlhodobých experimentálnych plôch mníchovskej katedry náuky o raste lesa, ku ktorým patria tiež niektoré pokusné plochy v Porýni-Falcku a Dolnom Sasku. Parametrizácia modelov prírastku sa zakladala na 404 pokusných parcelách s 578 časovými bodmi a viac než 150000 stromami. Tieto sady dát obsahujú informácie o vývoji hrúbky, výšky, výšky nasadenia koruny a šírky koruny v závislosti na stanovišti, rastovej konštelácii a vitalite jednotlivých stromov. Vďaka v Bavorsku už veľmi skoro zavedenému priestorovému chápaniu čistých a zmiešaných porastov a v minulých rokoch takmer 100 parcelám novo vybudovaných rastových radov v zmiešaných porastoch, bola k dispozícii objemom a kvalitou jedinečná sada údajov pre parametrizáciu modelu.

2. Ako dôležitý zdroj pre odvodenie absolútnych rámcov výškového a hrúbkového prírastku, ktoré tvorili podklad pre ekologickú bonitáciu podľa metodiky KAHN 1994, boli údaje z tabelárnej časti domácich rastových tabuliek (HALAJ ET AL. 1987), predovšetkým časové rady údajov výškových bonitačných vejárov a údajov rastu strednej porastovej hrúbky. Domáce rastové tabuľky sú založené na rozsiahlom pokusnom materiáli zloženom z poloprevádzkových výskumných plôch (PVP) a trvalých výskumných plôch (TVP), ktoré boli

zakladané a merané v rokoch 1964 až 1973 špeciálne pre účely ich konštrukcie. Okrem toho bol využitý aj cenný materiál vhodných TVP, založených v minulosti vedecko-výskumnými inštitúciami pre rozličné účely. Na viacerých z nich sa v tom čase konali už 3. prípadne 4. opakované merania. Celkový počet meraní tvorilo 2199 meraní pre drevinu smrek, 436 pre jedľu, 724 pre borovicu, 1239 pre buk a 746 pre dub. Podrobnejší popis pokusného materiálu ako aj samotnej konštrukcie rastových tabuliek sa nachádza v prácach (HALAJ-ŘEHÁK 1979, HALAJ ET AL. 1981).

3. Ďalším dôležitým zdrojom pre konštrukciu modelu boli údaje matematicko-štatistického prieskumu hrúbkovej štruktúry slovenských lesných porastov (HALAJ 1957) ako aj prieskum ich výškovej štruktúry (HALAJ 1978). Z uvedeného prieskumu boli využité predovšetkým vyrovnané empirické údaje hrúbkových a výškových početností uvádzané v tabelárnych prílohách. Tento materiál bol použitý predovšetkým na odvodenie vzťahov medzi maximálnou porastovou výškou (resp. maximálnou hrúbkou) a hornou porastovou výškou (resp. strednou hrúbkou) pre účely konštrukcie modelu ekologickej bonitácie. Hrúbkový prieskum bol založený na 740 porastoch smreka, 370 porastoch jedle, 380 porastoch borovice, 420 porastoch buka a 370 porastoch duba. Výšková štruktúra bola skúmaná na 85 TVP smreka, 57 TVP jedle, 55 TVP duba a 75 TVP buka. Rozsah pokusného materiálu zaručuje bezpečný štatistický prieskum hrúbkovej a výškovej štruktúry a tvoril nenahraditeľný zdroj údajov pre konštrukciu čiastkových algoritmov modelu.

4. Regionalizácia klimatických charakteristík bola prevedená pomocou publikovaných klimatických údajov z územia Slovenska. Využili sa priemerné mesačné klimatické dáta z rôznych časových období: 1901-1950, 1901-1970, 1931-1960, 1951-1980 a 1901-1980. Na základe doporučenia Národného klimatického programu Slovenskej republiky, boli všetky údaje transformované do referenčnej periódy a to 1951-1980 pre teplotné údaje a 1901-1980 pre zrážky. Transformácia údajov bola prevedená pomocou referenčných meteorologických staníc s najlepšou kvalitou dlhodobých pozorovaní a meraní. Konečná verzia klimatickej databázy reprezentuje 522 meteorologických staníc pre zrážkové údaje a 175 meteorologických staníc pre teplotné údaje.

Metódy

a) Výber stanovištných premenných

Na základe rozsiahlych výskumov a analýz založených na bohatom pokusnom materiáli popísanom v predchádzajúcom texte, bolo v nemeckých podmienkach vybratých 9 nasledujúcich stanovištných premenných:

s_1 ... obsah N_2O v ovzduší (ppb)

s_2 ... obsah CO_2 v ovzduší (ppm)

s_3 ... zásobovanie živinami v pôde (relatívna hodnota v rámci intervalu 0 až 1)

s_4 ... počet dní vegetačného obdobia (dní s priemernou dennou teplotou vyššou ako $10^{\circ}C$)

s_5 ... ročná teplotná amplitúda (rozdiel medzi minimálnou a maximálnou teplotou počas roka v $^{\circ}C$)

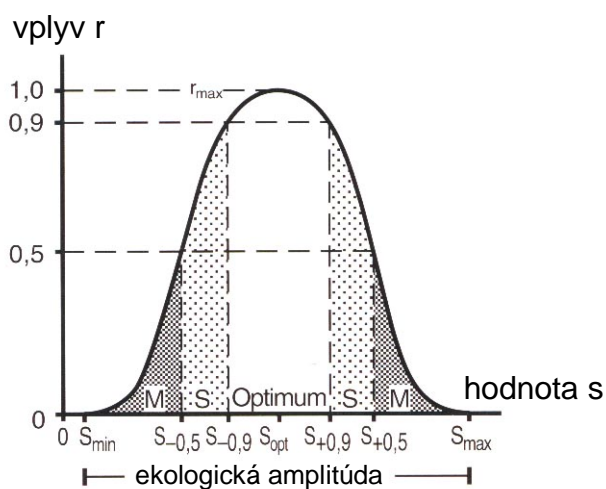
s_6 ... priemerná denná teplota vo vegetačnom období v $^{\circ}C$

s_7 ... pôdna vlhkosť (relatívna hodnota v rámci intervalu 0 až 1)

s_8 ... úhrn zrážok počas vegetačného obdobia v mm

s_9 ... index aridity podľa DE MARTONE v $mm \cdot ^{\circ}C^{-1}$ odvodený podľa:

$$s_9 = \frac{s_8}{s_6 + 10} \quad (2)$$



Obr.1 Princíp transformačnej funkcie

b) Odvodenie transformačných funkcií

Transformácia stanovištných premenných s_i na ich relatívnu hodnotu vplyvu r_i sa prevádza pomocou transformačných funkcií (vzťah 1). Funkcie boli zostrojené na analytickom základe a vychádzajú z teórie *fuzzy množín*. Princíp je zobrazený na obr.1.

Na osi x je znázornená ekologická amplitúda charakteristiky s , to znamená rozpätie od minimálnej po maximálnu hodnotu,

v rámci ktorého je schopná drevina prežiť (napríklad rozpätie priemerných teplôt v °C alebo úhrnu zrážok v mm). Na osi y je znázornená transformovaná hodnota vplyvu r , v intervale od 0 po 1. Ak stanovištná premenná s má vplyv na drevinu v rozmedzí od 0,9 po 1,0, tak sa drevina nachádza v *optimálnych* podmienkach. V intervale od 0,5 po 0,9 sa drevina nachádza v *suboptimálnych* podmienkach a v intervale od 0 po 0,5 v podmienkach *minimálnych* (resp. *pesimálnych*). Podľa uvedeného princípu boli zostrojené funkcie pre všetky dreveniny (smrek, jedľa, borovica, buk a dub) a stanovištné premenné. Na transformačnej funkcii uvedenej vo vzťahu 1 boli identifikované lomové body (c_j), medzi ktorými boli vytvorené linearizované transformačné úseky podľa:

$$r(s) = \begin{cases} (s \geq c_1) \wedge \left(s < c_1 + \frac{c_2 - c_1}{2} \right) \Rightarrow 2 \cdot \left(\frac{s - c_1}{c_2 - c_1} \right)^2 \\ \left(s \geq c_1 + \frac{c_2 - c_1}{2} \right) \wedge (s < c_2) \Rightarrow 1 - 2 \cdot \left(\frac{s - c_2}{c_2 - c_1} \right)^2 \\ (s \geq c_2) \wedge (s < c_3) \Rightarrow 1 \\ (s \geq c_3) \wedge \left(s < c_3 + \frac{c_4 - c_3}{2} \right) \Rightarrow 1 - 2 \cdot \left(\frac{s - c_3}{c_4 - c_3} \right)^2 \\ \left(s \geq c_3 + \frac{c_4 - c_3}{2} \right) \wedge (s < c_4) \Rightarrow 2 \cdot \left(\frac{s - c_4}{c_4 - c_3} \right)^2 \\ (s < c_1) \vee (s \geq c_4) \Rightarrow 0 \end{cases} \quad (3)$$

Uvedená funkcia je veľmi flexibilná a dokáže modelovať rôzne tvary transformačných funkcií s polohou optima v strede, v jeho okolí, ale aj na okraji rozpätia $\langle s_{\min}; s_{\max} \rangle$. Flexibilita je zabezpečená definíciou lomových bodov c_1 až c_4 , ktoré sa udávajú v absolútnych hodnotách danej stanovištnej premennej. Hodnoty koeficientov c_j sú uvedené v práci (PRETZSCH-KAHN 1998).

c) Odvodenie agregáčnych funkcií

Ďalším dôležitým krokom pre prechod z jednotlivých účinkov stanovištných premenných na komplexný účinok je odvodenie agregáčnych funkcií. Je potrebné si pritom uvedomiť, že niektoré faktory pôsobia ako limitujúce a niektoré ako spolupôsobiacie. U limitujúcich faktorov sa zväčša jedná o väzbu v logickom spojení „a“ to znamená všetky faktory musia spĺňať požadovanú úroveň. U spolupôsobiacich faktorov sa naproti tomu používa skôr väzba „alebo“, t.j. aspoň jeden z nich musí byť v požadovanom stave. Najčastejšie sú to však

prechodné vzťahy, kedy sa využívajú väzby niekde medzi oboma extrémami. V súvislosti s tým, sa ako veľmi flexibilná javí agregáčna funkcia s väzbami podľa návrhu ZIMMERMAN-ZYSNO (1980). Popísaný model bol využitý aj v rámci agregácie faktorov vplyvu r_i v modeli SILVA 2.2 (KAHN 1994) a bol využitý aj pre konštrukciu slovenskej ekologickej bonitácie Algoritmus spočíva na kalkulácii celkového **nutričného** efektu (r_N), celkového **termálneho** efektu (r_T) a celkového **humidného** efektu (r_H):

$$r_N = \left(\prod_{i=1}^3 r_i \right)^{1-\gamma_3} \cdot \left(1 - \prod_{i=1}^3 (1-r_i) \right)^{\gamma_3} \quad (4)$$

$$r_T = \left(\prod_{i=4}^6 r_i \right)^{1-\gamma_4} \cdot \left(1 - \prod_{i=4}^6 (1-r_i) \right)^{\gamma_4} \quad (5)$$

$$r_H = \left(\prod_{i=7}^9 r_i \right)^{1-\gamma_5} \cdot \left(1 - \prod_{i=7}^9 (1-r_i) \right)^{\gamma_5} \quad (6)$$

Nutričný efekt kombinuje faktory obsahu N_2O a CO_2 v ovzduší s obsahom živín v pôde. Termálny faktor kombinuje dĺžku vegetačného obdobia, s ročnou teplotnou amplitúdou a priemernou teplotou počas vegetačného obdobia. Humidný faktor kombinuje vlhkosť pôdy s úhrnom zrážok počas vegetačného obdobia a indexom aridity. Efekty sa potom ďalej agregujú do efektu redukcie asymptoty výškového potenciálu (r_A), efektu redukcie veku kulminácie výškového prírastkového potenciálu (r_{tkulm}) a efektu redukcie prírastkového potenciálu kruhovej základne (r_g):

$$r_A = (r_N \cdot r_T \cdot r_H)^{1-\gamma_1} \cdot (1 - (1-r_N)(1-r_T)(1-r_H))^{\gamma_1} \quad (7)$$

$$r_{tkulm} = (r_N \cdot r_T \cdot r_H)^{1-\gamma_2} \cdot (1 - (1-r_N)(1-r_T)(1-r_H))^{\gamma_2} \quad (8)$$

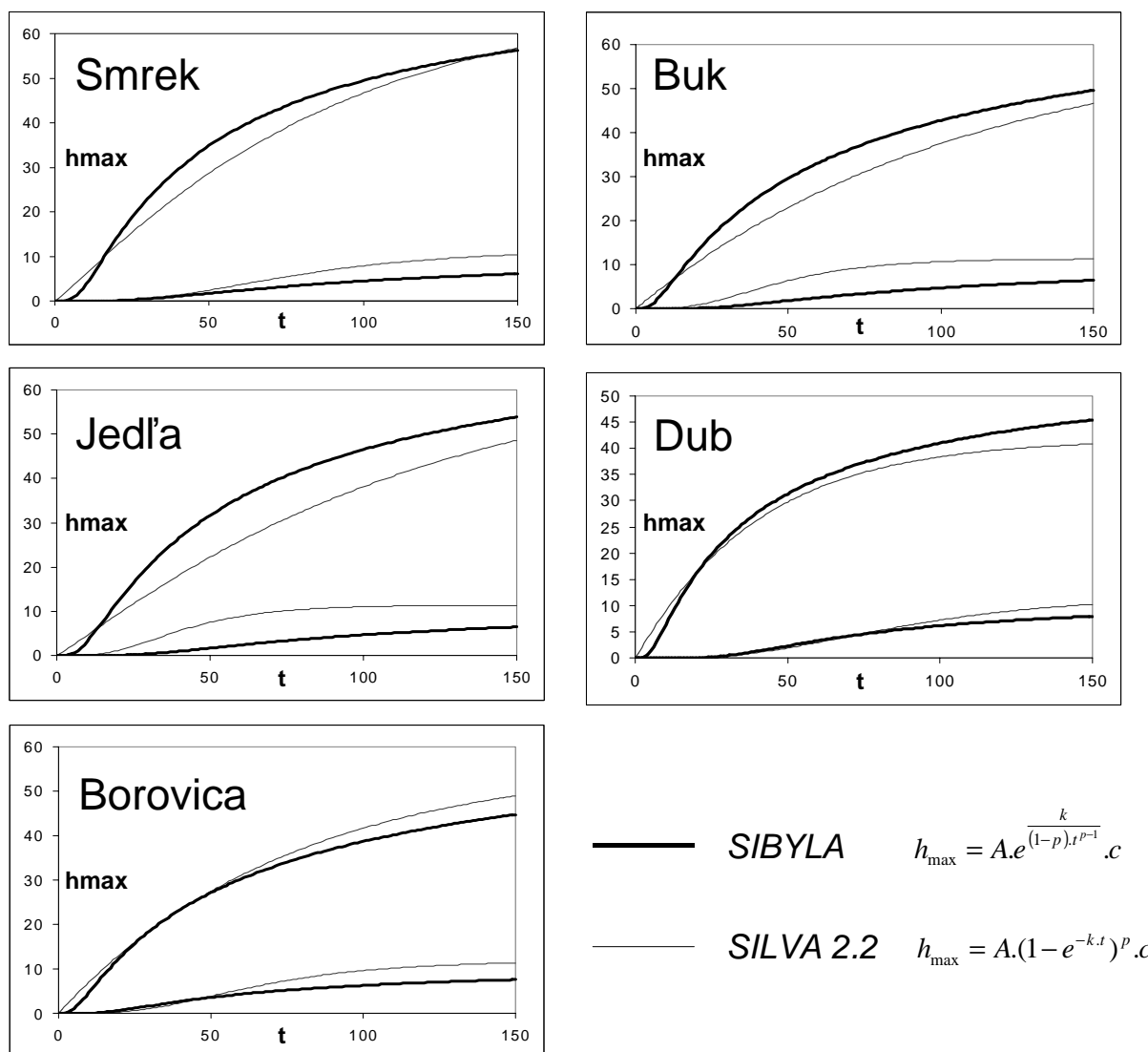
$$r_g = (r_N \cdot r_6 \cdot r_8)^{1-\gamma} \cdot (1 - (1-r_N)(1-r_6)(1-r_8))^{\gamma} \quad (9)$$

Pri efekte r_g sa v rámci termálneho faktora ukázal ako štatistický významný iba vplyv priemernej teploty počas vegetačného obdobia (r_6) a v rámci humidného faktora iba úhrn zrážok počas vegetačného obdobia (r_8). To bol dôvod prečo sa ostatné faktory vplyvu (r_4 , r_5 , r_7 , r_9) z agregáčnej funkcie vylúčili. Parametre agregáčnych funkcií γ boli odvodené na základe regresnej analýzy z údajov výskumných plôch (KAHN 1994) a sú uvedené v práci (PRETZSCH-KAHN 1998).

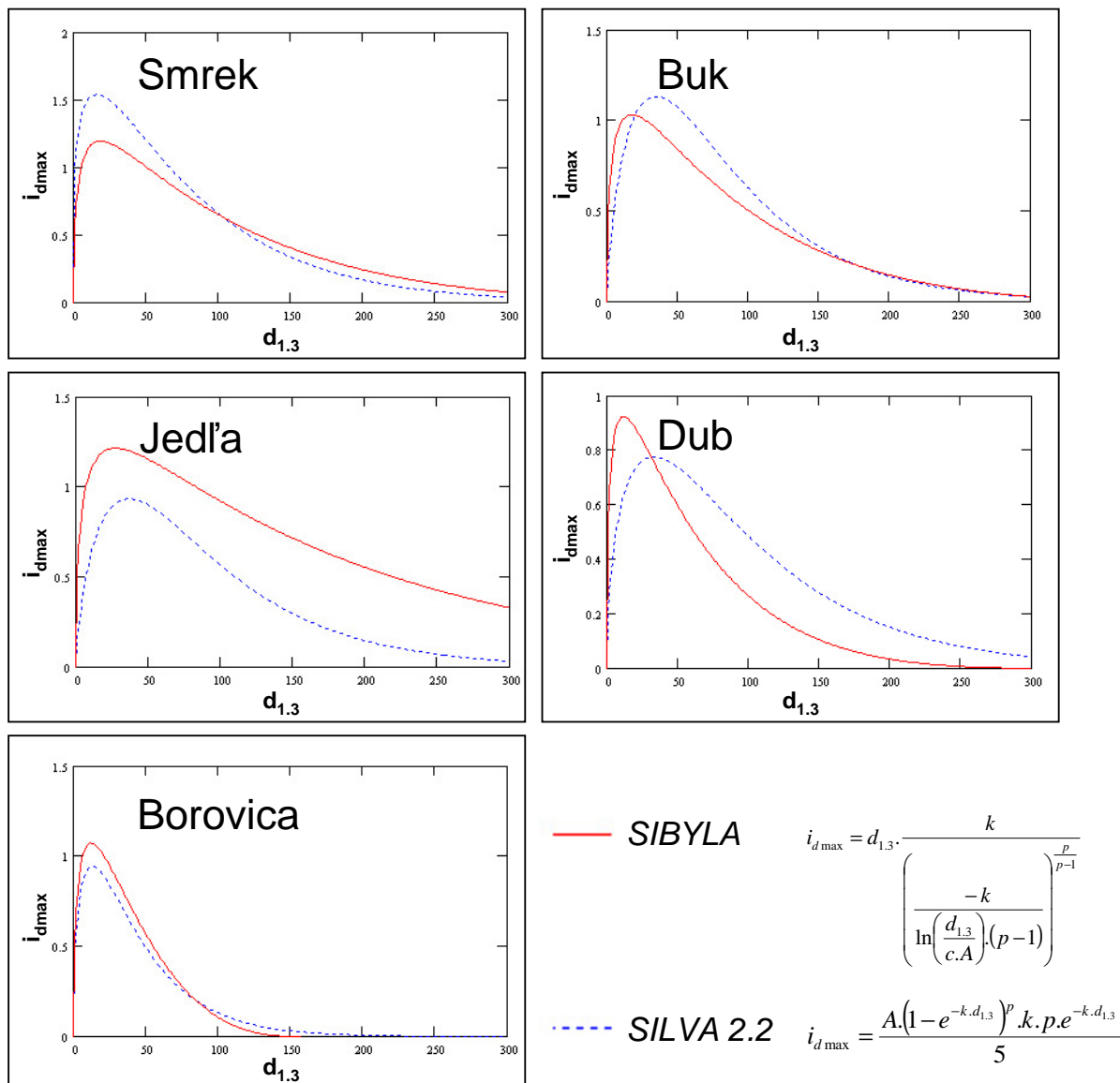
d) Produkčné rámce pre odvodenie prírastku stromov

Na základe údajov rastových tabuliek boli odvodené nové rámce pre hrúbkový a výškový rastový potenciál podľa metodiky KAHNA (1994). Výsledkom tohto modelu sú horné a spodné obalové výškové krivky modelované pomocou minimálnej a maximálnej asymptoty a minimálneho a maximálneho veku kulminácie výškového prírastku. Bola použitá KORFOVA rastová funkcia:

$$h_{\max} = c.A.e^{\frac{k}{(1-p).t^{p-1}}} \quad (10)$$



Obr.2 Porovnanie rozpätia výškového potenciálu pre modely SIBYLA



Obr.3 Porovnanie maximálneho hrúbkového prírastku v modeloch SIBYLA a SILVA 2.2

Funkcia popisuje vývoj výškového potenciálu (h_{max}) v závislosti od veku (t). Koeficienty modelu (A , k , p) boli odvodené z údajov rastových tabuliek (HALAJ ET AL. 1987) a koeficient c , ktorý vyjadruje pomer medzi maximálnou a hornou výškou je odvodený z prieskumu výškovej štruktúry slovenských porastov (HALAJ 1978) na základe analýzy frekvenčných výškových kriviek. Porovnanie nemeckého modelu SILVA 2.2 a slovenského modelu SIBYLA je na obr.2. Ďalším výsledkom modelu je hrúbkový prírastkový potenciál (i_{dmax}) závislý na hrúbke stromu ($d_{1.3}$) podľa funkcie:

$$i_{d \max} = d_{1.3} \cdot \frac{k}{\left(\frac{-k}{\ln\left(\frac{d_{1.3}}{c \cdot A}\right) \cdot (p-1)} \right)^{\frac{p}{p-1}}} \quad (11)$$

Koeficienty funkcie (A , k , p) boli odvodené z domácich rastových tabuliek (HALAJ ET AL. 1987) a koeficient c , ktorý vyjadruje vzťah medzi maximálnou a strednou hrúbkou je odvodený z prieskumu hrúbkovej štruktúry slovenských porastov (HALAJ 1957) pomocou analýzy frekvenčných hrúbkových kriviek. Porovnanie modelu SILVA 2.2 a SIBYLA je na obr.3.

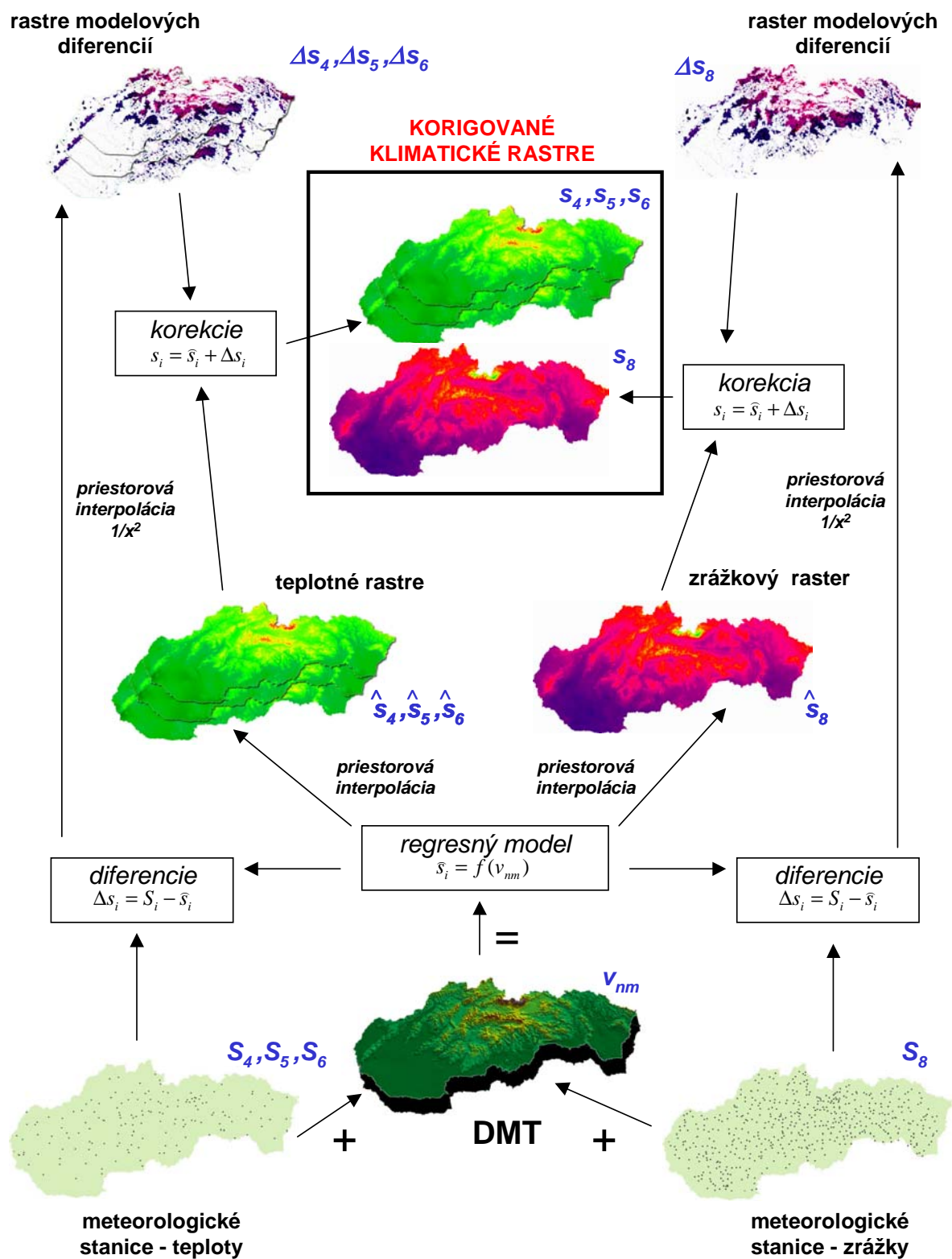
e) Model regionalizácie klimatických a pôdnych charakteristík

Ekologická bonitácia je flexibilnou a nesporne veľmi progresívnou metódou pre modelovanie rastu lesa. Jej hromadnému zavedeniu do lesníckej praxe však okrem náročnosti na konštrukciu modelov, bráni aj potreba príliš detailných vstupov ako sú klimatické charakteristiky. Tieto informácie sú buď nedostupné alebo v trhovom prostredí veľmi drahé. Preto sa ako ďalší logický krok siahlo k odvodeniu všeobecného modelu na generovanie klimatických charakteristík pomocou bežne dostupných lesníckych informácií vyplývajúcich napríklad z geografie a typizácie. Pri odvodzovaní modelu bolo potrebné vyriešiť nasledujúce úlohy:

- vytvoriť podrobný priestorový model na získanie klimatických charakteristík pomocou regionalizácie v prostredí geografického informačného systému (GIS),
- vytvoriť zovšeobecnený databázovo-matematický model na generovanie klimatických charakteristík prostredníctvom bežných informácií (oblasť lesov, nadmorská výška, expozícia, sklon),

V prvom kroku boli vypočítané klimatické (tzv. stanovištné) premenné (S_i) potrebné pre model ekologickej bonitácie: počet dní v roku s priemernou dennou teplotou vyššou ako 10 °C (S_4), ročná teplotná amplitúda (S_5), priemerná teplota v mesiacoch apríl až september (S_6) a priemerný úhrn zrážok za mesiace apríl až september (S_8). Pre potreby kalkulácie bola použitá metodológia svetovej meteorologickej organizácie (WMO). Ďalej boli odvodené regresné rovnice závislosti klimatických premenných (\bar{s}_i) na nadmorskej výške meteorologickej stanice (v_{nm}) určené pre regionalizáciu v prostredí GIS (obr.4):

$$\bar{s}_i = f(v_{nm}) \quad (12)$$



Pre každú meteorologickú stanicu boli vypočítané diferencie medzi skutočnou hodnotou (S_i) a modelovou hodnotou (\bar{s}_i):

$$\Delta s_i = S_i - \bar{s}_i \quad (13)$$

V druhom kroku boli pomocou regresných rovníc (12) vytvorené vrstvy klimatických rastrov v prostredí IDRISI32. Analýza bola prevedená operáciou lokálnej mapovej algebry na každom obrazovom prvku digitálneho modelu terénu (DMT). Ako vrstva DMT bol použitý raster odvodený digitalizáciou vrstevníc z topografickej mapy SR v mierke 1:50000 a ich priestorovou interpoláciou. Rozlišovacia schopnosť rastra bola 90 x 90 m. V treťom kroku bola vygenerovaná vrstva modelových diferencií zo vzťahu (13). Diferencie Δs boli priestorovo interpolované pomocou recipročnej mocninovej funkcie $1/x^2$, kde „ x “ je vzdialenosť od klimatickej stanice (pre interpoláciu boli použité údaje zo šiestich najbližších meteorologických staníc ku každému bodu). V štvrtom kroku bola prevedená operácia prekrytia vrstiev pomocou operácie súčtu medzi vrstvami klimatických rastrov a rastrami modelových diferencií:

$$s_i = \bar{s}_i + \Delta s_i \quad (14)$$

Výsledným produktom sú korigované klimatické rastre (MINĎÁŠ-ŠKVARENINA 2002, 2003) z rozlišovacím obrazovým prvkom 90 x 90 m pre všetky potrebné klimatické stanovištné premenné.

Regionalizované klimatické charakteristiky sú výborným podkladom pre ekologickú bonitáciu. V bežnej lesníckej praxi však ešte stále nie sú použiteľné, pretože ich aplikovanie vyžaduje prostredie rastrových geografických informačných systémov a samozrejme aj prepojenie softwarového riešenia modelu SIBYLA na takýto produkt. Tieto dôvody viedli k vytvoreniu ďalšieho modelu na zjednodušené generovanie klimatických údajov pomocou oblasti lesov, nadmorskej výšky, expozície a sklonu. Samozrejme, že takéto priblíženie bežnej prevádzky je na úkor presnosti výsledných vstupov. Aj napriek tomu je takýto model vysoko aplikovateľný.

Postup odvodenia a použitia modelu je nasledovný:

1. Bola vytvorená rastrová mapa oblasti lesov Slovenska pomocou ktorej sa vyrezali z digitálneho modelu terénu samostatné časti.

2. Pre každú časť bol odvodený spodný a horný výškový stupeň na základe nadmorskej výšky. Spodný výškový stupeň je tvorený rozpätím nadmorských výšok $\langle \min; \min + 25 \rangle$ a horný výškový stupeň rozpätím $\langle \max - 25; \max \rangle$.
3. Pre uvedené výškové stupne boli extrahované v prostredí IDRISI32 priemerné klimatické charakteristiky z regionalizovaných klimatických rastrov a bola odvodená výsledná **tabuľka klimatickej amplitúdy**.
4. Výsledná klimatická charakteristika sa odvodí z tabuľky klimatickej amplitúdy na základe príslušnosti lesného porastu (resp. simulačnej plochy) do oblasti lesov a interpoláciou podľa nadmorskej výšky:

$$s' = s_{\downarrow} + (s_{\uparrow} - s_{\downarrow}) \cdot \frac{v_{nm} - v_{nm \min}}{v_{nm \max} - v_{nm \min}} \quad (15)$$

kde $v_{nm \min}$ a $v_{nm \max}$ sú minimálne a maximálne nadmorské výšky príslušnej oblasti lesov, s_{\downarrow} a s_{\uparrow} sú klimatické stanovištné premenné pri minimálnej a maximálnej nadmorskej výške a v_{nm} je aktuálna nadmorská výška lesného porastu.

5. Interpolovaná klimatická charakteristika sa napokon upraví podľa expozície a sklonu porastu pomocou modifikátorov odvodených KAHNOM (1994):

$$s_4(DAYS) = s'_4 + \rho \cdot 10 \quad (16)$$

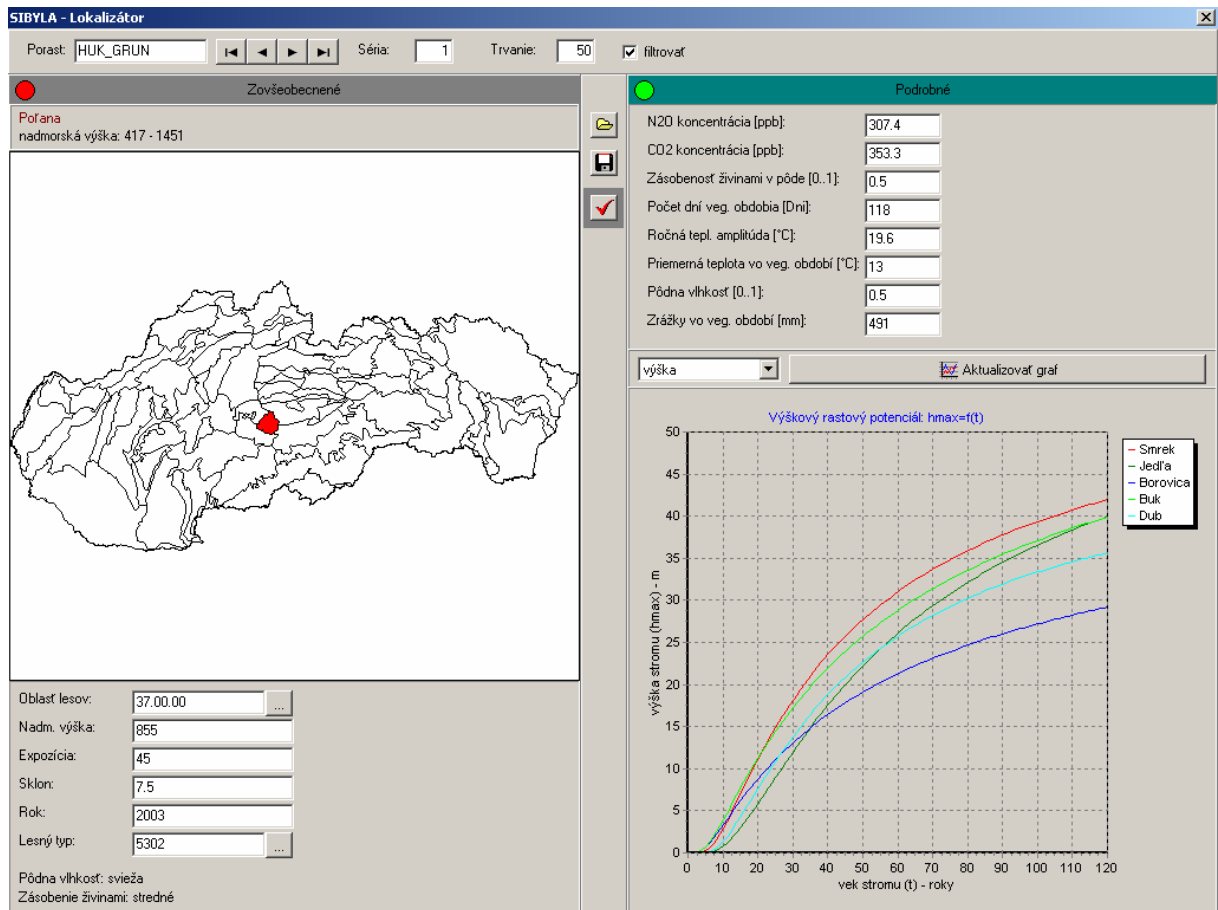
$$s_5(TAMPL) = s'_5 + \rho \quad (17)$$

$$s_6(TEMP) = s'_6 + \rho \quad (18)$$

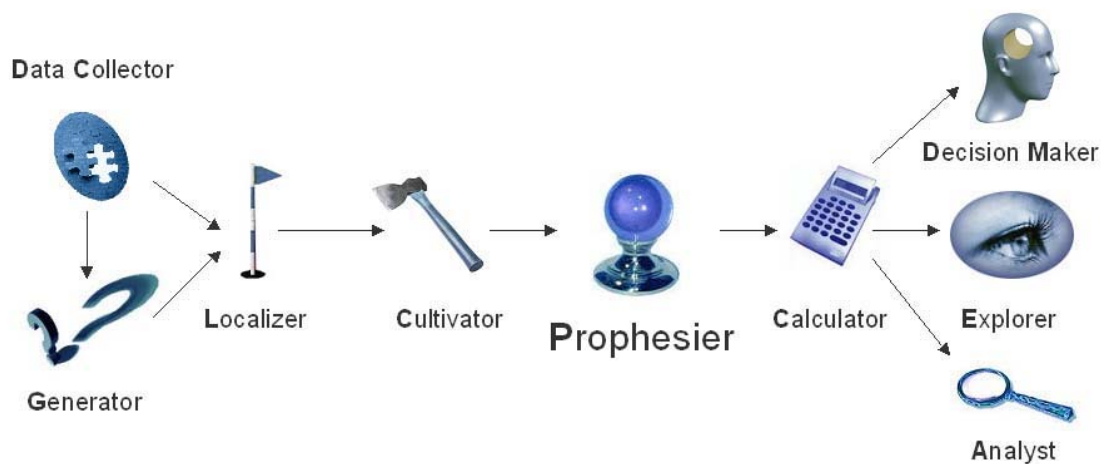
$$s_8(PRECIP) = s'_8 + \rho \cdot 50 \quad (19)$$

kde ρ je základný modifikátor závislý od sklonu (*slope*) a expozície (*aspect*) podľa:

$$\rho = \sin(\text{slope}) \cdot (-\cos(\text{aspect})) \quad (20)$$



Obr.5 Programový dialóg modulu SIBYLA - Localizer



Obr.6 Modulárna výstavba balíka programov SIBYA Suite

Výsledky a diskusia

Uvedený metodický postup a odvodené algoritmy pre ekologickú bonitáciu lesných drevín (smrek, jedľa, borovica, buk a dub) boli prevedené do formy počítačového programu s názvom SIBYLA - Localizer (obr.5) a integrované do softwarového riešenia rastového simulátora s názvom SIBYLA Suite (obr.6). Programové riešenie ekologickej bonitácie umožňuje špecifikovať podrobný alebo zovšeobecnený model vstupných stanovištných údajov pre definovanie potenciálnej produkčnej úrovne prírastku. V prípade ak sú detailné údaje o stave stanovištných premenných (s_1 až s_9) známe definujú sa priamo v pravom okne pre príslušný lesný porast. Ak údaje nie sú známe, tak sa špecifikuje oblasť lesov, nadmorská výška, expozícia, sklon, kalendárny rok a lesný typ v ľavom okne programu. Oblasť lesa a lesný typ je pritom možné zadať výberom zo zoznamu alebo priamo. Pre oblasť lesov je k dispozícii aj geografická mapa pre interaktívny výber kliknutím do mapy. Na základe vybratých vstupných charakteristík je možné aktualizovať graf výškového rastového potenciálu alebo graf hrúbkového prírastkového potenciálu pre všetky modelované dreviny (smrek, jedľa, borovica, buk a dub). Graf je možné zobrazit' vo forme grafickej, tabelárnej alebo algoritmickej. Významným prínosom je práve algoritmickej časť, ktorá umožňuje priamo vyčítať všetky koeficienty odvodeného modelu a použiť ich napríklad v iných programoch pre potreby simulácie rastu a prognózy. Takéto priame zverejnenie odvodených koeficientov sprehľadňuje algoritmus simulácie, robí ho transparentným a zabezpečuje, že model nefunguje ako „čierna skrinka“, čo je častým neduhom iných podobných modelov. Veľkou výhodou modelu jeho prepojenie na štrukturovanú databázu formátu MS Access, ktorá umožňuje hromadne vyplniť informácie pre veľký rozsah lesných porastov, prípadne uvedené informácie importovať z iných databázových tabuliek. Tento prístup spolu s prepojením na ďalšie moduly balíka programov SIBYLA Suite (obr.6) robí z modelu robustný nástroj na prognózovanie rastu lesa a prevádzať objektívne analýzy rizík lesných ekosystémov pod vplyvom klimatických zmien. Významným prínosom je hlavne fakt, že riešenie takejto ekologickej bonitácie integrovanej do účinného softwarového nástroja pre prognózovanie stavu lesa na Slovensku zatiaľ neexistovalo.

Súhrn

Príspevok predkladá model ekologickej bonitácie lesných porastov pre drevinu smrek, jedľa, borovica, buk a dub. Model vychádza z princípu modelovania rastového simulátora SILVA 2.2. Model sa skladá z definície stanovištných premenných vplyvujúcich na rast stromov, kvantifikácie oddeleného a súhrnného vplyvu stanovištných premenných na výškový a hrúbkový prírastok stromov (transformačné a agregáčne funkcie), modelu produkčných rámcov pre prírastky stromov a modelu regionalizácie klimatických a pôdných charakteristík. Výsledkom modelu je algoritmicke riešenie a počítačový program, ktorý umožňuje na základe klimatických a pôdných charakteristík stanoviť prírastkový potenciál pre rast hrúbky a výšky stromu. Program je integrovaný do rastového simulátora SIBYLA a umožňuje prognózovanie rastu lesa s ohľadom na rôzne klimatické scenáre.

Kľúčové slová: modelovanie rastu, rastový simulátor, rastový potenciál, vplyv klimatických premenných, regionalizácia klímy

Literatúra

- HALAJ, J., (1957): Matematicko-štatistický prieskum hrúbkovej štruktúry slovenských porastov. Lesnícky časopis, III/1, s.39-74
- HALAJ, J., (1978): Výškový rast a štruktúra porastov. Veda Bratislava, 284 s.
- HALAJ ET AL., (1987): Rastové tabuľky hlavných drevín ČSSR. Príroda Bratislava, 361 s.
- HALAJ, J., ŘEHÁK, J., (1979): Vyhotovenie rastových tabuliek hlavných drevín ČSSR. Lesnícke štúdie, č.30, 174 s.
- HASENAUER, H., (1994): Ein Einzelbaumsimulator für ungleichaltrige Fichten-Kiefern- und Buchen-Fichtenmischbestände. Forstliche Schriftenreihe Universität für Bodenkultur, Wien, Band 8, 152 s
- NAGEL, J., (1996): Anwendungsprogramm zur Bestandesbewertung und zur Prognose der Bestandesentwicklung. Forst ind Holz, 3, s.76-78.
- KAHN, M., (1994): Modellierung der Höhenentwicklung ausgewählter Baumarten in Abhängigkeit vom Standort. Forstliche Forschungsber. München, Vol. 141, 221 s.
- MINĎÁŠ, J., ŠKVARENINA, J., (2002): Klimatické rastre pre ekologickú bonitáciu. Nepublikovaný výsledok geografickej analýzy v prostredí IDRISI32 v rámci vedeckej spolupráce.
- MINĎÁŠ, J., ŠKVARENINA, J., (2003): Lesy Slovenska a globálne klimatické zmeny. EFRA Zvolen a Lesnícky výskumný ústav Zvolen, 129 s.
- NAGEL, J., (1996): Anwendungsprogramm zur Bestandesbewertung und zur Prognose der Bestandesentwicklung. Forst ind Holz, 3, s.76-78.
- PRETZSCH, H., (1992): Konzeption und Konstruktion von Wuchsmodellen für Rein- und Mischbestände. Forstliche Forschungsberichte München, Nr.115, 332 s.
- PRETZSCH, H., KAHN, M., (1998): Konzeption und Konstruktion des Wuchsmodells SILVA 2.2 - Methodische Grundlagen. *Abschlußbericht Projekt W 28*, Teil 2, München, 277 p.

PUKKALA, T., MIINA, J., (1997): A method for stochastic multiobjective optimization of stand management. Forest and Ecology Management. 98, s.189-203.

STERBA, H., (1995): Prognaus – ein absandsunabhängiger Wachstumssimulator für ungleichaltrige Mischbestände. DVFF – Sektion Ertragskunde, Joachimstahl, s.173-183.

ZIMMERMANN, H.J., ZYSNO, P., (1980): Latent connectives in human decision making. Fuzzy Sets and Systems, H.4, s.37-51

Kontaktná adresa:

Ing. Marek Fabrika, PhD., Technická univerzita vo Zvolene, Katedra hospodárskej úpravy lesov a geodézie, T. G. Masaryka 24, 96053 Zvolen,
tel.: 045-5206298, fax.: 045-5332654, e-mail: fabrika@vsld.tuzvo.sk