

VYUŽITIE PROSTRIEDKOV GIS PRE PROCESNÉ ZJEMŇOVANIE SIMULÁCIÍ RASTU LESNÝCH EKOSYSTÉMOV

Lucia MACKOVÁ, Ľubomír SMAŽÁK

Katedra hospodárskej úpravy lesov a geodézie, Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, Zvolenská cesta 630/39, 962 63, Pliešovce, Slovensko, mackova@zlatnictvosm.sk

Katedra hospodárskej úpravy lesov a geodézie, Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, Korňa č.766, 023 21, Korňa, Slovensko, lubbar@centrum.sk

Abstrakt

Cieľom práce je prispieť k hybridizácii rastového simulátora SIBYLA. Výsledky budú použité na vypracovanie podkladov pre realizáciu podrobnejších simulácií a na modelovanie fyziologických procesov zachytených počas roka a to za časovú jednotku kratšiu ako jeden rok a prepracovaním sa z úrovne stromu na úroveň listu. Využije sa procesné modelovanie, ktoré sa prepojí s rastovým simulátorom a ukáže sa aj na použiteľnosť geografických informačných technológií v tejto oblasti.

Kľúčové slová: modelovanie, rastový simulátor, simulácia, fyziologický proces,

Abstract

The aim of this work is contribute to the hybridization of growth simulator SIBYLA. The results will be used to prepare the documents for the implementation of detailed simulation and modeling of physiological processes collected during the year and per unit of time less than a year and a recasting from the tree level to the level of leaf. It will use the process modeling, which is linked with growth simulator and also shows the applicability of geographical information technologies in this field.

Keywords: modeling, growth simulator, simulation, physiological process,

ÚVOD

Pre harmonický vývoj spoločnosti je vo všetkých vyspelých krajinách sveta zdôrazňovaný nenahraditeľný význam lesných ekosystémov. Zodpovedanie otázky komplexného výskumu a využívania obnoviteľných prírodných zdrojov, ako aj zabezpečovania ochrany a tvorby prírodného aj životného prostredia je a predovšetkým bude, jednou zo základných priorít ľudskej populácie. Keďže lesy majú životnosť, ktorá spravidla presahuje trvanie profesionálnej dráhy jednotlivého výskumníka, dochádza k sťažovaniu experimentálneho skúmania lesných ekosystémov. Tento základný fakt vyžaduje uplatnenie vlastných pokusných metód, ktoré je možné využiť pri obhospodarovaní a predovšetkým plánovaní opatrení v lesných spoločenstvách (Fabrika a Pretzsch 2011). Súčasný rozvoj lesníckej vedy dokázal preklenúť problém týkajúci sa rozporu medzi dlhovekosťou lesov a praxou jedného výskumníka aplikáciou modelov rastu a vývoja lesa. Počas 200 ročnej histórie lesníckeho modelovania došlo k značným pokrokom. Dnešné rastové modely už dokážu poskytnúť komplexnejšie výsledky, dokážu flexibilne reagovať na vnútorné či vonkajšie podnety dotýkajúce sa lesných ekosystémov. Výstupy modelov umožňujú zorientovanie v produkčných, ekonomických aj ekologických oblastiach. Ako už bolo spomenuté, pre riešenie rôznych problémov sú pre lesné hospodárstvo dôležité modely rastu a vývoja lesa. Preto sa v tejto práci budeme venovať zvýšeniu detailu simulácii rastu lesných ekosystémov v rastovom simulátore SIBYLA. Zjemnenie rastových simulácií chceme dosiahnuť skrátením časovej jednotky, za ktorú dokáže SIBYLA poskytnúť výsledky. Využije sa procesné modelovanie, ktoré sa prepojí s rastovým simulátorom a poukáže sa na upotrebitelnosť geografických informačných technológií v tejto oblasti. Výsledkom by malo byť vypracovanie podkladov na realizáciu podrobnejších simulácií a to zjemnením časového rozlíšenia modelu zachytením fyziologických procesov počas roka a to za časovú jednotku kratšiu ako jeden rok a prepracovaním sa z úrovne stromu na úroveň orgánu, listu. Hlavným cieľom práce by mala byť hybridizácia modelu spresnením

modelu slnečného žiarenia skonštruovaného Fabrikom (2010) a jeho prepojením na ostatné procesy. Táto práca má za účel vypracovať podklady na kalibráciu modelu slnečného žiarenia pomocou empirických hodnôt získaných na výskumných plochách.

1 Rozbor problematiky

S príchodom počítačov sa otvorili nové možnosti, ktoré jednak umožňujú lepšiu prácu s klasickými nástrojmi ako je počítačová analýza rovníc a jednak úplne nové prístupy, ako je napríklad práve počítačové modelovanie a simulácie. Tieto prístupy umožňujú analyzovať výrazne zložitejšie systémy, ktoré pozostávajú z viacerých častí, ktoré sú komplikovaným spôsobom previazané a zložite sa vzájomne ovplyvňujú. Takýmto komplexným systémom, ktorý je možno riešiť pomocou počítačových simulácií je lesný ekosystém (Pelánek 2011).

1.1 Modely rastu lesa

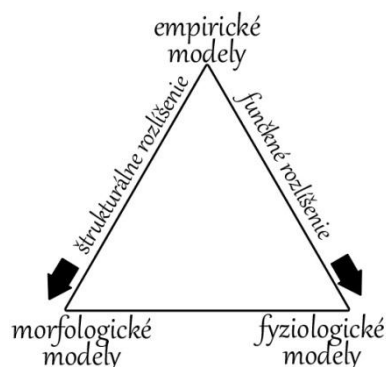
Modely lesného rastu a z nich vyplývajúce simulátory sú zjednodušené, účelovo orientované zobrazenia skutočnosti. Ich koncepcie a konštrukcie majú byť preto riadené objektovo špecifickými systémovými vlastnosťami lesných porastov ako dlhovekosť, historickosť, otvorenosť alebo determinujúca štruktúra (PRETZSCH 2002).

Vznikajú dve skupiny rastových modelov. Prvá skupina je postavená na raste lesa ako súboru stromov a prognózovaní porastových taxačných veličín, druhá na modelovaní parametrov a rastu jednotlivého stromu v rámci súboru stromov (FABRIKA 2005).

Ako prvé boli spracované rastové tabuľky. Rastové tabuľky sú matematickým modelom, ktorý vo forme sústavy matematických rovníc definuje vývoj lesa (FABRIKA 2008). Značnú inováciu rastových tabuliek predstavujú rastové simulátory. Všeobecne možno simulátory definovať ako počítačový model reálneho sveta vo forme modelu štruktúry alebo chovania systému, ktorá sa snaží reálny systém čo najvernejšie napodobňovať. Simulátor lesných ekosystémov je simulátor, ktorý sa snaží o napodobňovanie chovania lesných ekosystémov. Rastové simulátory využívajú teóriu modelovania systémov na napodobnenie rastových procesov jednotlivých stromov a porastov pri rôznych faktoroch prostredia a pestovných opatreniach (FABRIKA 2005). Rastové modely môžu poskytnúť objektívne predpovede ponúkajúce informácie potrebné k udržaniu ťažieb v rámci trvalo udržateľnej kapacity lesa a poskytujú kvantitatívne dáta pre krajinné plánovanie (VANCLAY 1994).

KURTH (1994) navrhol grafické zobrazenie klasifikácie modelov podľa metód modelovania pomocou trojuholníka modelov, ktorý je zobrazený na obrázku 1.

Empirické modely sa nachádzajú na hornom vrchole trojuholníka, pretože sú z hľadiska úrovne modelovania najviac agregované. Sú to modely, ktoré sa zameriavajú na zmenu biometrických stavových premenných v čase. Vychádzajú zo štatistických metód odvodených z experimentálnych meraní, čo znamená, že sú postavené na empiricky odvodených vzťahoch. Platnosť týchto modelov je obmedzená len pre základný súbor, s ktorým sa viaže výberová vzorka. V prípade, že potrebujeme model použiť pre iný základný súbor, je potrebné urobiť kalibráciu. Medzi prvotné výstupy modelu patria biometrické stavové parametre ako sú hrúbka, výška stromov alebo kruhová základňa resp. zásoba porastu. Základný princíp empirického modelovania spočíva v zmene základného stavu lesného porastu pomocou biometrických rovníc.



Obr. 1 Klasifikácia modelov lesa na základe metód modelovania podľa trojuholníka modelov navrhnutého Kurthom (1994)

Keďže rastové modely pracujú na rôznych úrovniach, môžeme empirické modely rozdeliť na stromové, frekvenčné a porastové modely. Rozdiely medzi jednotlivými modelmi spočívajú predovšetkým v stavových premenných, ktoré sú základom modelovania jednotlivých modelov.

Ďalší vrchol v trojuholníku klasifikácie modelov na základe metód modelovania zastupujú morfologické alebo inak *štrukturálne modely*. Táto skupina modelov modeluje morfológiu jednotlivých stromov, pričom sa opiera o topológiu orgánov a architektúru stromov. Ich podstatou je dopracovať sa k odvodeniu štruktúry stromov, formovaniu kmeňa, vetiev, listov a plodov. Pre dosiahnutie tohto cieľa využívajú prvky fraktálnej geometrie. Poslednú zložku trojuholníka klasifikácie modelov na základe metód modelovania zastupujú kauzálne alebo inak nazývané aj procesné modely, ktoré budú popísané v nasledujúcej kapitole. Pre komplexnejšie pochopenie niektorých systémov vznikli tzv. hybridné modely, ktoré využívajú prvky z dvoch, alebo viacerých typov modelov.

1.2 Procesné modely

Procesné modely podliehajú v súčasnosti najdynamickejšiemu vývoju (FABRIKA a PRETZSCH 2011). Od empirických modelov sa odlišujú tým, že sa snažia predpovedať výsledný rast na základe opisu procesov, ktoré mu predchádzajú a interakciami medzi nimi (LANDSBERG 2003). Použitie procesných modelov by preto malo viesť k presnejším výsledkom (ZEIDE 2003). Nevyhnutné je však postupne upustiť od empirických prístupov, najlepším riešením je postupný prechod od empirických, cez hybridné a na koniec k procesným modelom (MÄKÄLA et al. 2000). Ďalšou značnou výhodou procesných modelov je, že majú všeobecnejšiu platnosť. Aj keď tieto modely je potrebné tiež kalibrovať, ak ich chceme použiť napr. na iný vegetačný typ, alebo na inú drevinu (FABRIKA a PRETZSCH 2011).

Procesy, ktoré súvisia s rastom sa dajú popísať na základe zjednodušeného systému. Základom je slnečné žiarenie, ktorým začína proces fotosyntézy. Asimilačné orgány zachytia slnečné žiarenie, čím sa následne produkujú uhľovodíky. V ďalšom kroku premieňajú energiu pre syntézu bielkovín a formáciu nových pletív a potom sú translokované do jednotlivých rastlinných orgánov. Efektivita fotosyntézy závisí vo veľkej miere od stavu olistenia a príjmu CO₂ cez prieduchy. Funkcia prieduchov je závislá od vodnej bilancie rastliny. Na priebeh rastových procesov majú vplyv mnohé ďalšie faktory. K najzávažnejším faktorom, ktoré ovplyvňujú rastové procesy patria teplota prostredia, pôdna vlhkosť, vlhkosť ovzdušia, minerálna bohatosť pôdy, prístupnosť živín koreňom rastlín, stav škodlivín v prostredí a mnohé ďalšie. Už len z takéhoto zjednodušeného popisu vyplýva, že ide o komplikovaný proces s množstvom vzájomných interakcií (LANDSBERG 2003).

Aj procesné modely aplikujú rôzne experimentálne merania, ktoré sa koncentrujú na podrobné klimatické merania, merania vlastností pôdy, merania kolobehu vody, merania množstva slnečného žiarenia, fyzikálno – chemické merania, výkon fotosyntézy a podobne. Základné procesy, ktoré predstavujú predmet modelovania procesných modelov sú absorpcia svetla, intercepcia, transpirácia, evapotranspirácia, fotosyntéza, respirácia, alokácia, senescencia a podobne (FABRIKA a PRETZSCH 2011).

2. METODIKA ZJEMNENIA RASTOVÝCH SIMULÁCIÍ EMPIRICKÉHO MODELU SIBYLA A EXPERIMENTÁLNY MATERIÁL

Hlavná časť práce je implementovaná do prostredia rastového simulátora SIBYLA. Je to empirický model, ktorého algoritmy sú odvodené zo širokej experimentálnej základne. V súčasnosti podáva SIBYLA výstupy v rámci rastových tabuliek, tabuliek biomasy, tabuliek biodiverzity, tabuliek sortimentov, hodnotových tabuliek, ekonomických tabuliek a tabuliek multikriteriálneho hodnotenia porastu. Model je kalibrovaný a má svoju presnosť aj správnosť. Rámcová metodika práce zahŕňa modelovanie fyziologických procesov prebiehajúcich v rastlinách počas roka.

2.1 Modelovanie fyziologických procesov

Pre zachytenie fyziologických procesov prebiehajúcich v rastlinách je potrebné definovať algoritmy na modelovanie absorpcie slnečného žiarenia, modelovanie pedotransféry funkcií, hydrologickej bilancie, vodivosti prieduchov, transpirácie, energetickej bilancie listov, fotosyntézy a respirácie. Všetky významné procesy rastu stromu ovplyvňuje stav pôdy. Pôda predstavuje hlavný zdroj vody a látok rozpustných vo vode, ktoré sú prijímané prostredníctvom koreňov (FABRIKA a PRETZSCH 2011). Pôdne stanovištné premenné t.j. zásobovanie živinami v pôde a pôdna vlhkosť sú už zakomponované v rastovom simulátore SIBYLA v jeho module lokalizátor. Podľa zvolenej skúmanej lokality dokáže simulátor vygenerovať následovné stanovištné premenné: obsah NO_x v ovzduší, obsah CO_2 v ovzduší, zásobovanie živinami v pôde, počet dní vegetačného obdobia, ročná teplotná amplituda, priemerná denná teplota vo vegetačnom, pôdna vlhkosť, úhrn zrážok počas vegetačného obdobia v mm, index aridity podľa *de Martoneho* v $\text{mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

Pre kalkuláciu **pedotransféry funkcií** (SAXTON a RAWLS 2006) potrebujeme základné vstupné parametre ako podiel piesku, ílu, prachu, humusu, štrku, vlhkosť pôdy, hĺbka pôdy, faktor hustoty a salinita pôdy. Generovanie pôdnych stanovištných premenných t.j. zásobovanie živinami v pôde a pôdna vlhkosť, je riešené s simulátore transformáciou pôvodných relatívnych hodnôt do kvalitatívnych stupňov, ktoré majú definované rozpätie relatívnych hodnôt a stredové hodnoty. Pre obsah živín v pôde je vytvorených 5 stupňov a pre pôdnu vlhkosť 9 stupňov. Stupne sú prevzaté z práce *Chena a Hwanga (1992)*. Zaradenie do kvalitatívneho stupňa sa potom prevádza na základe príslušnosti lesného porastu (simulačnej plochy) do lesného typu. Prevodová tabuľka z lesného typu na stupne pôdnej vlhkosti a zásobenia živinami v pôde bola vytvorená *Ujházym (2001)*.

Pre rast stromov a priebeh fyziologických procesov sú dôležité pôdne hydrolimity ako je bod vädnutia, poľná kapacita, nasýtená vodná kapacita a potenciálna rastlinám dostupná voda. Aby sme uvedené hydrolimity vypočítali, potrebujeme stanoviť charakteristiky ako hustotu materskej pôdy, objemovú zložku štrku, celkovú hustotu pôdy, tenziu pôdnej vlhkosti v rozpätí 33 kPa – vzduch a 1500 – 33 kPa – vzduch, vodivosť nasýtenej materskej pôdy, vodivosť materskej pôdy pri nasýtenej vlhkosti, osmotický potenciál pri nasýtenej vlhkosti, osmotický potenciál pri aktuálnej vlhkosti.

Akýkoľvek pokus modelovať rast lesov musí zahŕňať výpočty bilancie vody v pôde, ktorá musí brať do úvahy charakteristiky udržiavania pôdnej vlhkosti a schopnosti pôdy zabezpečiť dostatočnú vodu potrebnú pre rast stromov (LANDSBERG a SANDS 2011). Pre namodelovanie **hydrologickej bilancie** potrebujeme vykalkulovať charakteristiky ako je čistá radiácia nad povrchom pôdy, vodivosť pôdy, intercepcia, evaporácia, transpirácia, odtok, nasýtený vodný potenciál listu, aktuálny vodný potenciál listu, až sa nakoniec dopracujeme k aktuálnej pôdnej vlhkosti. Prieduchy regulujú energiu a výmenu plynov medzi vegetáciou a atmosférou, a naopak. Odhady **vodivosti prieduchov** sú preto dôležité. Pre odvodenie vodivosti prieduchov použijeme Jarvisov model (JARVIS 1976). V tomto modeli je potrebné vypočítať charakteristiky ako je omega faktor pre fotosynteticky aktívne žiarenie, omega faktor pre teplotu, omega faktor pre deficit tlaku vodných pár, omega faktor pre vodný potenciál listu. Z týchto faktorov sa následne odvodí celkový omega faktor a vypočíta sa vodivosť prieduchov, ako aj odpor prieduchov.

Na výpočet **vodivosti prieduchov** potrebujeme základné vstupné parametre ako je maximálna vodivosť prieduchov, koeficient krivosti pre fotosynteticky aktívne žiarenie, maximálnu, optimálnu a minimálnu teplotu, deficit tlaku vodných pár pre otváranie a zatváranie prieduchov, vodný potenciál listu pre otváranie a zatváranie prieduchov.

Na modelovanie procesu **transpirácie** v procesných modeloch sa využíva Penman-Monteithova rovnica (MONTEITH 1990).

Pre modelovanie **energetickej bilancie listu** potrebujeme poznať základné environmentálne parametre ako je krátkovlnné žiarenie, rýchlosť vetra, teplota vzduchu a relatívna vlhkosť. Ďalšími vstupnými parametrami sú listové parametre a to špecifická listová plocha, distribúcia uhlov listov, absorbovateľnosť krátkovlnného žiarenia. Pri modelovaní energetickej bilancie listu sa budeme snažiť namodelovať čistú radiáciu a následne teplotu listu, ktorá ovplyvňuje fyziologické procesy.

Fotosyntéza je základný proces v ekofyziologických modeloch. Na modelovanie použije model podľa Farquhara a von Caemmerer (FARQUHAR et al. 1982). Model počíta fotosyntetickú rýchlosť ako minimum obmedzení enzýmu Rubisco, ktorá je zastúpená parametrom $V_{C_{max}}$ a elektrónovým transportom odrážajúcim regeneráciou enzýmu Rubisco, ktorý je zase zastúpený parametrom J_{max} (LANDSBERG a SANDS 2011).

Na modelovanie **respirácie** sme vybrali metódu podľa autora McCREE (1970). Na namodelovanie procesu respirácie touto metódou potrebujeme poznať základné vstupné veličiny pre rastové a udržiavacie dýchanie.

Pri modelovaní **fenológie listu** je dôležité správne namodelovať obdobie, v ktorom začínajú stromy pučať. Pri ihličnatých drevinách je pre modelovanie vzniku a veľkosti nových ročníkov ihlič dôležité obdobie začiatku olistenia a jeho plný stav. Pre namodelovanie opadu listov alebo straty starších ročníkov ihlič počas roka je dôležitý koniec vegetačného obdobia (FABRIKA a PRETZSCH 2011).

Na namodelovanie fenologickej krivky listu počas roka potrebujeme stanoviť deň začiatku a konca vegetačnej periódy (pučanie listu), deň začiatku a konca plnej fotosyntetickej aktivity, deň začiatku a konca fotosyntetickej aktivity a počet dní dlhej a krátkej vegetačnej aktivity. Algoritmy pre modelovanie začiatku a konca fotosyntetickej aktivity:

- začiatok plnej fotosyntetickej aktivity t_2 : číslo dňa = $t_1 + (t_3 - t_1) / 2$
- koniec plnej fotosyntetickej aktivity t_5 : číslo dňa = $t_4 + (t_6 - t_4) / 2$

kde t_1 predstavuje deň začiatku vegetačnej periódy, t_3 deň začiatku plnej fotosyntetickej aktivity, t_4 deň ukončenia plnej fotosyntetickej aktivity, t_6 číslo dňa konca vegetačnej periódy.

V prvom rade sa určí listová plocha a následne budeme potrebovať redukčné fenologické koeficienty pre jednotlivé časti fenologickej krivky listu počas roka. Ak máme stanovené redukčné faktory pre jednotlivé časti, následne môžeme vypočítať aktuálnu listovú plochu.

Pre modelovanie jednotlivých fyziologických procesov sú potrebné vstupné parametre na prevedenie algoritmov. Vstupné parametre sa navzájom líšia a závisia od druhu dreviny, od orgánu stromu a konkrétneho fyziologického procesu, ktorého simuláciu má softvér vykonať. Konkretizovanie vstupných parametrov je uvedené v nasledujúcich častiach pri algoritmoch jednotlivých fyziologických procesoch.

2.2 Modelovanie slnečného žiarenia

Pre modelovanie fyziologických procesov prebiehajúcich v rastlinách je potrebné v prvom rade namodelovať absorpciu slnečného žiarenia, ktoré predstavuje hlavný zdroj energie rastliny, pretože až za prítomnosti slnečného žiarenia začína prebiehať proces fotosyntézy. Modelovanie slnečného žiarenia je potrebné rozdeliť na modelovanie žiarenia na voľnej ploche a modelovanie žiarenia v zápoji. Tieto zložky sú obsiahnuté v rastovom simulátore SIBYLA a jeho module Astronóm, ktorý vyhotovil FABRIKA (2012). Modelovanie žiarenia na voľnej ploche obsahuje model oblačnosti, model horizontu, model slnečnej trajektórie a model radiácie. Algoritmické riešenie žiarenia na voľnej ploche podrobne rozoberá FABRIKA a PRETZSCH (2011). Softvérové riešenie žiarenia na voľnej ploche v rastovom simulátore SIBYLA rieši jeho model Astronóm.

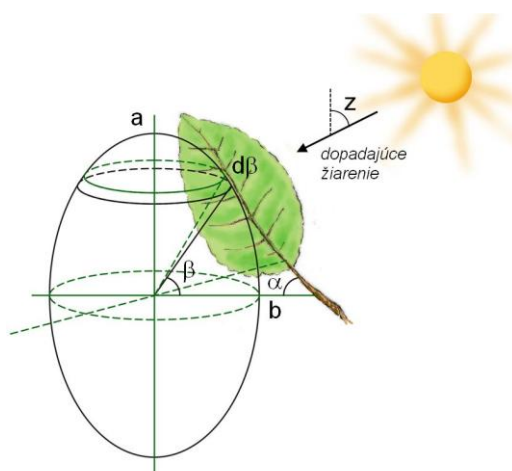
V rámci tejto práce je dôležité riešenie modelu žiarenia v zápoji. Na určenie prekážok na horizonte pre priame žiarenie sa použijú prostriedky geografických informačných systémov. Model žiarenia v zápoji zahŕňa model hemisféry zápoja a model absorpcie žiarenia. Model hemisféry zápoja je riešený pomocou metódy Ray – tracing, v rámci ktorej sa hodnotia prekážky v smere sledovaného lúča. Vstupnými údajmi pre tento model je uhol lúča, v rámci ktorého sa sledujú jednotlivé prekážky. Ďalším vstupom je krok resp. vzdialenosť, pri ktorej sa mení azimut a zenitový uhol sledovaného lúča.

Pre každý strom je potrebné zachytiť 3 hemisféry, ktoré zachytávajú stav na vrchole koruny, na báze koruny a na predele koruny medzi osvetlenou a zatienenou časťou koruny. Z tohto dôvodu sa vyžadujú vstupné

údaje o vrchole koruny, báze a predele koruny. Na základe slnečnej trajektórie, polohy Slnka a a stavu hemisféry sa vypočíta podiel priameho a difúzneho žiarenia oproti situácii na voľnej ploche bez lesného porastu. Pri riešení modulu absorpcie slnečného žiarenia sa využíva Lambert – Beerov zákon (1960), ktorý predstavuje matematické vyjadrenie závislosti absorpcie elektromagnetického žiarenia od vlastnosti materiálu, cez ktoré prechádza žiarenie.

Pre modelovanie slnečného žiarenia v poraste sa používa rovnica: $\varphi = \varphi_0 * e^{-kLAI}$, kde φ predstavuje žiarenie v poraste, φ_0 žiarenie nad porastom, k je koeficient poklesu žiarenia a LAI je index listovej plochy. Orientácia listov a smer slnečného žiarenia v značnej miere ovplyvňuje pokles slnečného žiarenia pri prenikaní do porastu. Koeficient poklesu žiarenia v závislosti od smeru slnečného žiarenia a orientácie listov sa počíta podľa Campbellovho elipsoidu. Elipsoidná orientácia listov podľa Campbella je znázornená na obrázku 2.

Pokles slnečného žiarenia závisí tiež aj od listovej plochy, cez ktorú žiarenie prechádza. Pomer povrchu listov vegetácie a povrchu územia, na ktorom táto vegetácia rastie predstavuje index listovej plochy.



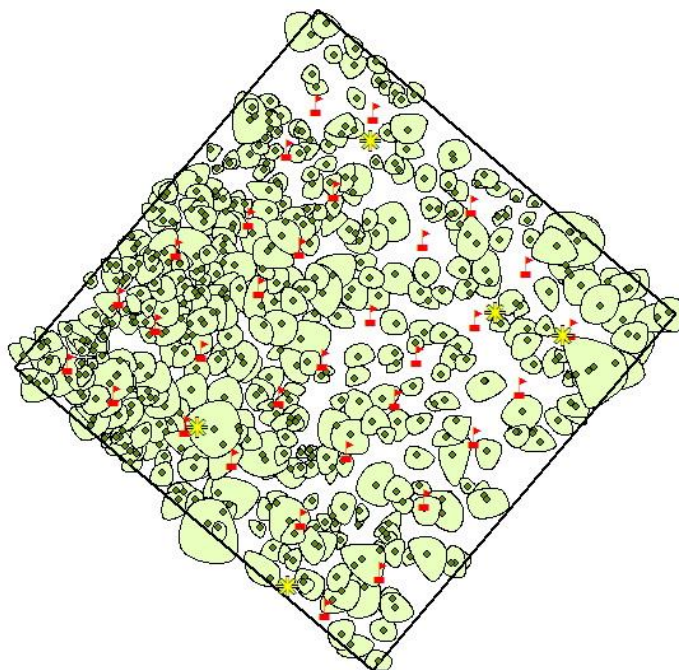
Obr. 2 Elipsoidná orientácia listov podľa Campbella (FABRIKA a PRETZSCH 2011)

2.3 Experimentálny materiál

Keďže rastový simulátor SIBYLA je vyvinutý pre základné dreviny buk, dub, jedľa, borovica a smrek, potrebovali sme zvoliť také záujmové územie, ktoré bude obsahovať zmes všetkých piatich hlavných drevín. Túto prioritnú podmienku spĺňal lesný porast Vysokoškolského lesného podniku v oblasti Kašova Lehôtka č. 721. V rámci tohto dielca sa pre naše účely založila výskumná plocha s výmerou 1 ha. Táto výskumná plocha bola vytýčená pomocou zostavy Field – Map. Uvedeným prístrojom bola zameraná poloha všetkých stromov, korunová projekcia a viedla sa databáza stromov podľa typu drevín. Na celej ploche sa urobilo priemerovanie na plno pomocou priemery a výškomera Vertex.

2.4 Vizualizácia nameraných údajov

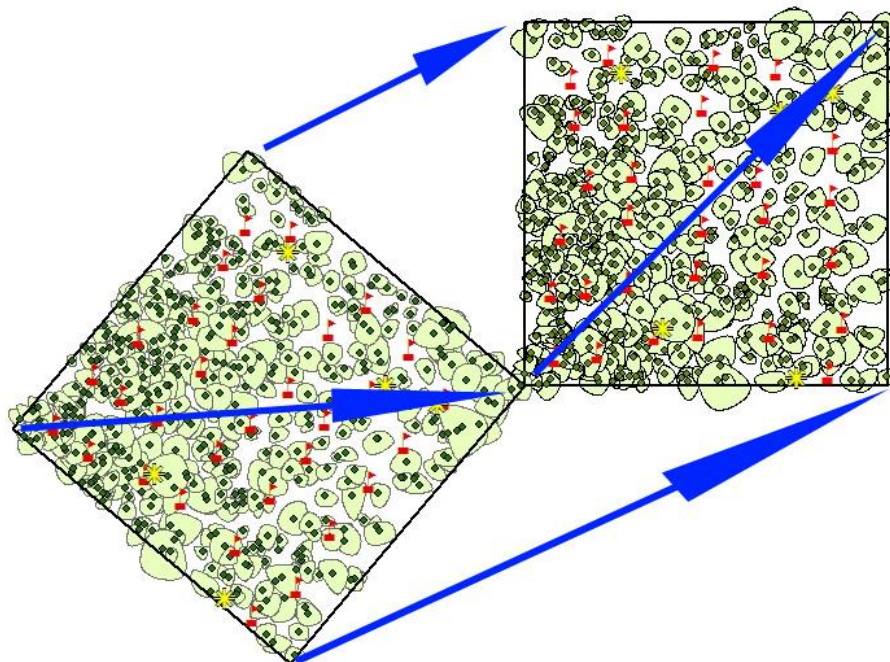
Zobrazenie pôdorysu výskumnej plochy, s rozmiestnením stromov a korunových projekcií na ploche bolo riešené v prostredí programu ArcGis a je znázornené na obrázku č. 3.



Obr. 3 Pôdorys výskumnej plochy so zachytením stromov a korunovej projekcie na ploche

SIBYLA pracuje s vlastným lokálnym súradnicovým systémom, preto bolo potrebné transformovať súradnice plochy, čo sa vykonalo v prostredí ArcGis, obr.4.

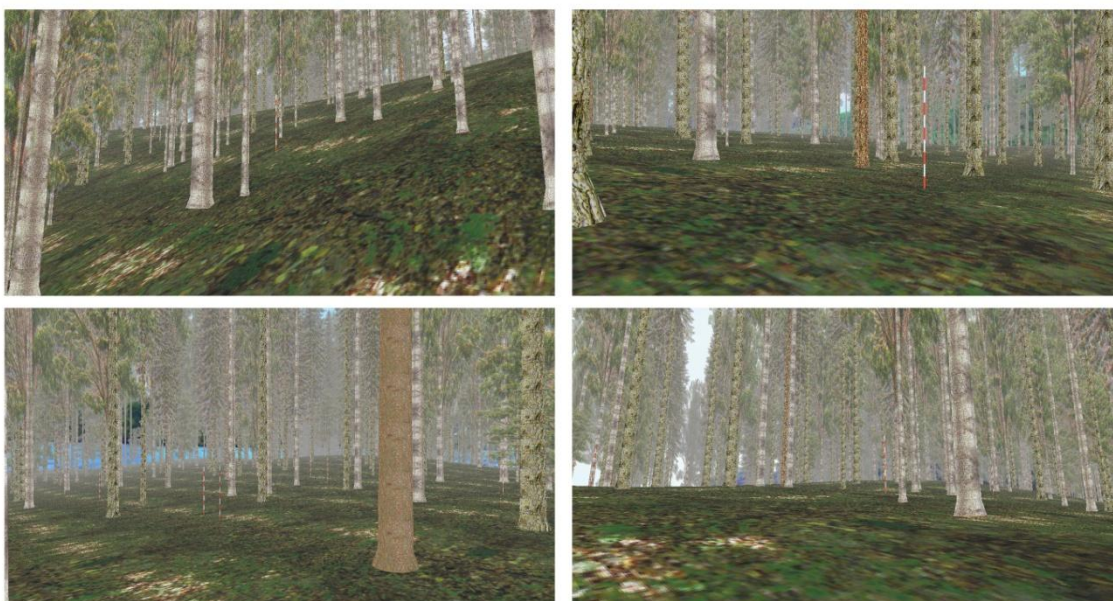
Keďže rastový simulátor SIBYLA vizualizuje aj terén, bolo potrebné vytvoriť digitálny model reliéfu. Pre odvodenie terénu sme najprv určili presnú polohu výskumnej plochy v rámci súradnicovej siete S-JTSK03. Pre presné zameranie rohových (lomových) bodov výskumnej plochy bolo použitá statická metóda merania s korekciami SKPOS prijímačom TOPCON Hiper GGD vhodného pre presné geodetické úlohy. Jedná sa o duálny dvojfrekvenčný prístroj obsahujúci 40 sledovacích kanálov. Anténa prijímača umožňuje elimináciu prijímania odrazeného signálu družíc vnášajúceho nepresnosť do meraní. Výrobcom udávaná presnosť pre statickú metódu merania je 3 mm + 0,5 ppm v horizontálnej polohe a 5 mm + 0,5 ppm vo vertikálnej polohe. Tieto hodnoty presnosti výrobcu udáva pre meranie na voľnom priestranstve. Nakoľko GNSS meranie je v lesnom prostredí vo všeobecnosti menej presné a spoľahlivé, použili sme dlhší interval merania, a síce 30 minút na každom bode. Tým sme nepriaznivý vplyv korún stromov na presnosť merania výrazne eliminovali.



Obr. 4 Transformácia súradníc lomových bodov v prostredí ArcGis

Na základe presnej polohy výskumnej plochy sme si použili výrez z digitálneho modelu reliéfu vyhotoveného na základe laserového skenovania. Na skenovanie bol použitý letecký laserový skener Riegl L-680i, kde priemerná hustota bodov dát skenovaných v septembri 2011 je 6,8 bodov na m².

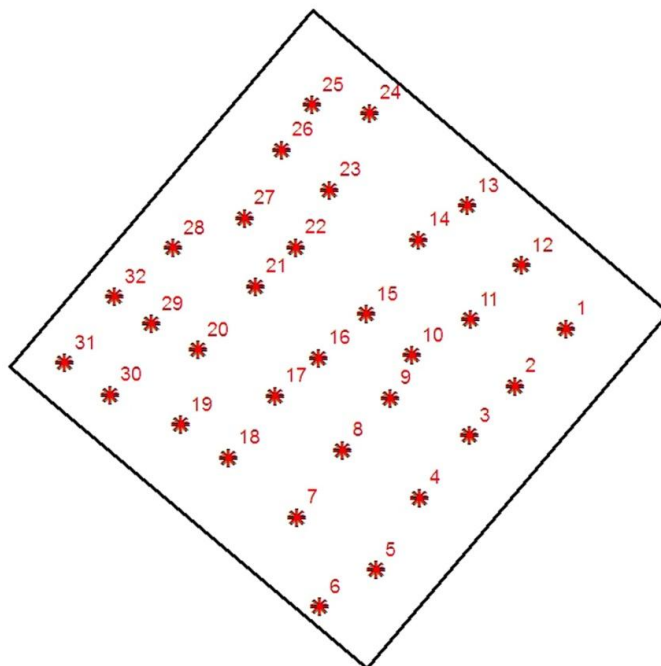
Lesný porast z údajov, ktoré boli namerané na výskumnej ploche sme importovali do rastového simulátora SIBYLA. Východiskový stav tohto lesného porastu je zobrazený na obrázku 5, kde je zobrazená virtuálna realita porastu zo 4 pohľadov. Jednotlivé pohľady sú zachytené z rohov výskumnej plochy. Výtyčky zobrazené na obrázkoch reprezentujú body, na ktorých sa vyhotovovali hemisférické snímky.



Obr. 5 Zobrazenie virtuálnej reality lesného porastu z výskumnej plochy

Na takto zvolenom záujmovom území sa pre odvodenie indexu listovej plochy, fotosynteticky aktívneho žiarenia, stanovenie difúznej zložky žiarenia, uhla inklinácie listov, veľkosti otvorov porastového zápoja

v teréne použili dva typy analyzátorov rastlinného zápoja. Pomocou obidvoch typov analyzátorov rastlinného zápoja sa na výskumnej ploche vyhotovili hemisférické snímky na 32 bodoch, obrázok 6. Body boli umiestňované v približne rovnakých rozostupoch a pri umiestňovaní bodov sa kládol najväčší dôraz na zachytenie typického porastového zápoja ako aj porastových otvorov.



Obr. 6 Umiestnenie bodov pre vyhotovenie hemisférických snímok

Záver

História modelovania lesa prešla v rámci lesníckej vedy značným vývojom. V súčasnej dobe sa oblasť modelovania rastu lesa uberať smerom procesného modelovania, ktoré by malo prispieť k zvýšeniu presnosti lesného rastu. Zakomponovanie procesných modelov do rastu lesa by malo zvýšiť využiteľnosť v rámci prepojenia na prírodu blízke obhospodarovanie lesa. V predkladanej práci sú sledované tieto najnovšie trendy, ako aj výsledky, ktoré sa dosiahli v posledných rokoch v danej problematike. Cieľom je tieto poznatky zakomponovať do rastového simulátora SIBYLA a prispieť tak k lesníckemu modelovaniu na Slovensku. Vzhľadom na to, že procesné modelovanie nebolo doteraz v oblasti lesníckeho výskumu na Slovensku prebádané, verím, že tieto výsledky prispedia k väčšiemu záujmu o danú problematiku. Táto práca zhrnula zoznam fyziologických procesov potrebných pre procesné zjemnenie rastového simulátora SIBYLA a konkretizovala algoritmy pre odvodenie jednotlivých fyziologických procesov potrebných pre vyčíslenie čistej primárnej produkcie za kratšiu časovú jednotku ako jeden rok. Práca nadväzuje na predchádzajúce rozširovanie rastového simulátora SIBYLA v rámci práce Štruktúrne – funkčné koncepty v modelovaní lesa pre zvyšovanie detailu simulácií rastu lesných ekosystémov, ktorú podrobne v súčasnosti rozpracúva interný doktorand Ing. Martin Schön. Na túto prácu sa plánuje nadviazať v ďalšej práci, v rámci ktorej sa plánuje preveriť model slnečného žiarenia. Pomocou párových testov sa budú porovnávať výsledky z rastového simulátora SIBYLA s výsledkami empirických meraní vykonaných na výskumnej ploche. V tejto práci sa tiež poukázalo na upotrebitelnosť geografických informačných technológií v oblasti lesníckeho mapovania. Výsledky tejto práce budú použité ako vstupy pre zjemnenie rastových simulácií v rastovom simulátore SIBYLA. Očakávané výsledky tejto práce majú prispieť ku kalibrácii modelu slnečného žiarenia. Správne fungovanie modelu umožní kvantifikovať množstvo slnečného žiarenia prijímaného asimilačnými orgánmi a následne sa stanoví výkon fotosyntézy, čo umožní vypočítať jednotlivé fyziologické procesy. Výsledkom fyziologických procesov je vypočítať množstvo čistej primárnej produkcie aj za hodinový interval. Predpokladaným prínosom je vytvoriť významnú učebnú pomôcku v pedagogickom procese, pomocou ktorej

môžu študenti lepšie pochopiť súvislosti medzi zmenou prírodných podmienok a vnútornými dejmi rastliny vplyvujúcimi na rast stromu.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

1. FABRIKA, M. 2005: Simulátor biodynamiky lesa – Konceptia, konštrukcia a programové riešenie (Habilitačná práca). Technická univerzita vo Zvolene, Lesnícka fakulta, Katedra hospodárskej úpravy lesov a geodézie. Zvolen, 2005
2. FABRIKA, M. 2008: <http://etools.tuzvo.sk/sibyla/slovensky/model.htm>
3. FABRIKA, M. 2010: Počítačom podporované modelovanie lesa, súčasný stav a perspektívy, Biometria, informatika, inventarizácia, modelovanie lesa – základ pre precízne lesníctvo, Zborník referátov z vedeckého seminára, Zvolen 2010
4. FABRIKA, M., PRETZSCH, H. 2011 : Analýza a modelovanie lesných ekosystémov. Technická Univerzita vo Zvolene, Zvolen 2011, s. 15 – 599
5. FABRIKA, M., 2012 : Softvérový doplnok k rastovému simulátoru SIBYLA
6. FARQUHAR, G.D., VON CAEMMERER, S. (1982): Modelling of photosynthetic response to environmental conditions. In: LANGE, O. L., NOBEL, P. S., OSMOND, C. B., ZIEGLER, H. (eds): Encyklopaedia of Plant Physiology. Vol. 12B, Springer – Verlag, Berlin, 548 – 587
7. CHEN, S.J., HWANG, CH.L., (1992): Fuzzy multiple attribute decision making: methods and applications. Springer, Berlin, 536 s.
8. JARVIS, P. G. 1976 : The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. Philos. Trans. Roy. Soc. London B, 273 (1976), pp. 593–610
9. KURTH, W. (1994): Morphological models of plant growth: Possibilities and ecological relevance, Ecological Modeling 75/76, 1994, 299-308
10. LANDSBERG, J. 2003: Physiology in forest models: History and the future, FBMISS Volume 1, 2003, 49-63.
11. LANDSBERG, J. J., SANDS, P. 2011 : Physiological Ecology of Forest Production : Principles, Processes and Models. Amsterdam : Elsevier, 2011. 331 s., obr., tab. Terrestrial Ecology Series, Volume 4. ISBN 978-0-12-374460-9.
12. MÄKELÄ, A., LANDSBERG, J.J., EK, A.E., BURK, T.E., TER-MIKAELIAN, M., ÅGREN, G., OLIVER, C.D., PUTTONEN, P. (2000): Process-based models for forest ecosystem management: current state-of-art and challenges for practical implementation. 2000, Tree Physiology 20: s. 289-298.
13. MCCREE, K. J., 1970: An equation for the rate of respiration of white clover plants grown under controlled conditions. In: ŠETLIK, I. (ed): Prediction and Measurement of Photosynthetic Productivity. PUDOC, Wageningen, 221 – 229
14. MONTEITH, J. L. UNSWORTH, M. H., 1990: Principles of Environmental Physics. Edward Arnold, London
15. PELÁNEK, R. 2011: Modelování a simulace komplexních systémů, Masarykova univerzita, Brno 2011, s. 14 – 233
16. PRETZSCH, H. 2002: Grundlagen der Waldwachstumsforschung, BeZlin: Parey, 2002; ISBN: 3-8263-322-3-7, Blackwell verlag GmbH, 414 s.

17. SAXTON, K. E., RAWLS, W.J., 2006: Soil Water characteristic estimates by texture and organic matter for hydraulic solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70 s, s. 1569 – 1578
18. UJHÁZY, K., (2001): Tabuľka vlhkosti a trofnosti pre lesné typy. Nepublikovaný výsledok v rámci vedeckej spolupráce.
19. VANCLAY, K.J. 1994: *Modelling Forest Growth and Yield Applications to Mixed Tropical Forests*, 1994
20. ZEIDE, B. 2003: The U-approach to forest modeling, *Canadian Journal of Forest Research*; Mar 2003; 33, 3; 480-489