



TECHNICKÁ UNIVERZITA VO ZVOLENE





Analýza a modelovanie lesných ekosystémov

© Technická univerzita vo Zvolene, Zvolene 2011

Autori: Doc. Ing. Marek Fabrika, PhD.
Prof. Dr. Dr. h. c. Hans Pretzsch

Ilustrácie: RNDr. Boris Beláček, PhD.

Jazyková korektúra: Mgr. Mária Fabriková

Recenzovali: Prof. Ing. Jan Kouba, CSc.
Prof. Dr. Dr. h. c. Branislav Sloboda
Prof. Ing. Štefan Šmelko, DrSc.

Grafická úprava, zalomenie, produkcia: Renesans, s. r. o.

ISBN: 978-80-228-2181-0





**Marek Fabrika
Hans Pretzsch**

**ANALÝZA
A MODELOVANIE
LESNÝCH
EKOSYSTÉMOV**



TECHNICKÁ UNIVERZITA VO ZVOLENE





**Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj pre projekt:
Centrum excelentnosti: Adaptívne lesné ekosystémy, ITMS: 26220120006, spolufinancovaný zo
zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.**



Agentúra
Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR
pre štrukturálne fondy EÚ

Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/
Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ



Európska únia
Európsky fond regionálneho rozvoja



OBSAH

Predhovor	11
Úvod	15
1 Ekosystémové a ekofyziologické základy modelovania lesa (Fabrika)	27
1.1 Les ako ekosystém.....	28
1.1.1 Strom a faktory prostredia.....	28
1.1.2 Definícia lesného prostredia	29
1.1.3 Hierarchia života lesa	33
1.1.4 Ekologická postupnosť lesa	35
1.1.5 Vývojový cyklus prírodného lesa.....	36
1.1.6 Vývojový cyklus hospodárskeho lesa.....	37
1.2 Kolobeh látok a energie v prostredí lesa	41
1.2.1 Chemické zloženie biosféry.....	41
1.2.2 Kolobeh vody	42
1.2.3 Kolobeh uhlíka.....	45
1.2.4 Kolobeh dusíka	46
1.2.5 Slniečna radiácia a svetlo	47
1.3 Ekofyziológia stromu.....	52
1.3.1 Vnútoraná stavba stromu	52
1.3.2 Odozva stromov na podnety.....	56
1.3.3 Tvorba látok v strome.....	56
1.3.4 Transport látok v strome.....	60
2 Kybernetické základy modelovania lesa (Fabrika a Pretzsch)	67
2.1 Les ako kybernetický systém	68
2.1.1 Les ako dlhoveký systém.....	77
2.1.2 Les ako otvorený systém	80
2.1.3 Les ako štrukturálne determinovaný systém	82
2.1.4 Les ako systém formovaný históriou.....	84
2.1.5 Les ako hierarchicky organizovaný systém	86
2.1.6 Les ako systém s multikriteriálnymi výstupnými veličinami.....	90
2.2 Kybernetické modelovanie lesa.....	91
2.2.1 Od systému k modelu	91
2.2.2 Matice väzieb a štruktúry v modelovaní lesa	95
2.2.3 Systémové diagramy v modelovaní lesa	96
2.2.4 Modely chovania lesa	98
2.2.5 Modely štruktúry lesa	101
3 Biometrické základy modelovania lesa (Fabrika).....	107
3.1 Základné biometrické charakteristiky.....	108
3.2 Základy teórie pravdepodobnosti.....	110
3.2.1 Frekvenčná a distribučná funkcia	110
3.2.2 Základné diskkrétne rozdelenia pravdepodobnosti.....	112
3.2.3 Základné spojité rozdelenia pravdepodobnosti	112

3.3	Dendrometrické charakteristiky stromu a porastu	113
3.3.1	Základné dendrometrické charakteristiky stromu	113
3.3.2	Základné dendrometrické charakteristiky porastu	116
3.4	Štatistické metódy v modelovaní lesa	119
3.4.1	Regresná analýza	120
3.4.2	Kontingenčné tabuľky	123
3.4.3	Analýza variancie	123
3.4.4	Analýza kovariancie	125
3.4.5	Diskriminačná analýza	126
3.4.6	Zhluková analýza	129
3.4.7	Faktorová analýza	131
3.5	Reprodukcia variability	135
3.5.1	Reprodukcia variability pomocou metódy Monte Carlo	137
3.5.2	Reprodukcia variability pomocou inverznej transformačnej metódy	138
3.5.3	Aproximačná metóda reprodukcie variability pre normálne rozdelenie	139
3.5.4	Teoretická chyba modelu odvodená reprodukciou variability	140
3.6	Štatistické hodnotenie modelov	141
3.6.1	Vychýlenie, presnosť a správnosť	141
3.6.2	Odvodenie systematickej a náhodnej chyby modelu	143
3.6.3	Prenášanie chýb	146
3.6.4	Metódy hodnotenia a prispôsobenia modelov	147

4 Zákony, zákonitosti, pravidlá a teórie v modelovaní lesa (Pretzsch)155

4.1	Zákonitosť rastu a prírastku	156
4.1.1	Rastová a prírastková funkcia	156
4.1.2	Relatívna rýchlosť rastu a relatívny prírastok	158
4.1.3	Multiplikátory rastu	159
4.1.4	Všeobecná systémová infraštruktúra sigmoidného rastu	161
4.1.5	Fyziologické zdôvodnenie rastových kriviek	162
4.1.6	Prehľad osvedčených rastových a prírastkových funkcií	162
4.2	Alometrické pravidlo zmeny tvaru	164
4.2.1	Princíp a biometrická formulácia alometrie	164
4.2.2	Biologické vysvetlenie alometrie	166
4.3	Pravidlá produkčného priestoru	167
4.3.1	Reinekeho pravidlo hustoty porastu	168
4.3.2	Yodovo samodiferenciačné pravidlo	169
4.3.3	Vzťah medzi alometriou, Yodovým a Reinekeho pravidlom	170
4.3.4	Od zákona priestorovej alometrie k pravidlu samodiferenciácie	171
4.4	Zákon dávky a účinku	171
4.4.1	Unimodálna funkcia dávky a účinku	172
4.4.2	Príklady unimodálnej funkcie	173
4.4.3	Teória kolísania dávky	175
4.4.4	Komplexný účinok dávky	176
4.4.5	Ekologická bonita	177
4.5	Eichhornov zákon a jeho deriváty	178
4.5.1	Bonita porastu	180
4.5.2	Stupeň produkčnej úrovne	181
4.6	Teória optimálnej a kritickej kruhovej základne	181
4.6.1	Assmannova teória kruhovej základne	182
4.6.2	Unimodálna funkcia dávky a účinku na báze Assmannovej teórie	183

5	Modely dynamiky a rastových procesov lesa (Fabrika)	189
5.1	Simulátory lesných ekosystémov	190
5.1.1	Premenné a parametre rastových simulátorov	191
5.2	Klasifikácia modelov lesa	193
5.2.1	Klasifikácia modelov podľa metód modelovania	193
5.2.2	Klasifikácia modelov podľa časovo-hierarchickej úrovne.....	197
5.2.3	Klasifikácia modelov podľa hierarchicko-priestorovej úrovne s príkladmi modelov.....	200
6	Metódy empirického modelovania lesných ekosystémov (Fabrika a Pretzsch).....	231
6.1	Modelovanie kmeňa stromu.....	232
6.1.1	Metódy merania tvaru kmeňa	232
6.1.2	Od merania k modelu tvaru kmeňa.....	235
6.1.3	Modelovanie morfolologickej krivky kmeňa	236
6.1.4	Modelovanie objemu kmeňa.....	239
6.2	Modelovanie koruny stromu	242
6.2.1	Metódy merania a analýzy štruktúry koruny.....	244
6.2.2	Modelovanie tvaru koruny stromu	246
6.2.3	Modelovanie biometrických charakteristík koruny	248
6.3	Modelovanie hrúbkovej štruktúry porastu.....	251
6.3.1	Základné vlastnosti a charakteristiky hrúbkovej štruktúry	252
6.3.2	Frekvenčné hrúbkové funkcie.....	253
6.3.3	Modelovanie dynamiky hrúbkovej štruktúry	257
6.4	Modelovanie výškovej štruktúry porastu.....	261
6.4.1	Základné vlastnosti a charakteristiky výškovej štruktúry	261
6.4.2	Typy výškových kriviek.....	262
6.4.3	Modelovanie výškovej krivky.....	264
6.5	Modelovanie priestorovej štruktúry porastu.....	266
6.5.1	Poissonov les ako referenčná báza pre diagnózu horizontálnej štruktúry.....	268
6.5.2	Modelovanie spôsobu horizontálneho rozmiestnenia stromov	269
6.5.3	Modelovanie hustoty porastu.....	276
6.5.4	Modelovanie diferenciacie.....	282
6.5.5	Modelovanie diverzity.....	283
6.5.6	Modelovanie premiešania	286
6.5.7	Generovanie priestorovej štruktúry porastu	288
6.6	Modelovanie konkurencie stromov	292
6.6.1	Metódy stanovenia konkurentov stromov	292
6.6.2	Metódy modelovania konkurencie stromov	294
6.6.3	Korekcia okrajových efektov	307
6.7	Modelovanie odumierania stromov	311
6.7.1	Modelovanie prirodzenej mortality	313
6.7.2	Modelovanie odumierania stromov pod vplyvom rizika.....	317
6.8	Modelovanie ťažbových zásahov.....	329
6.8.1	Modelovanie biosociologického postavenia stromu.....	329
6.8.2	Modelovanie existenčného a prebierkového skóre stromu.....	331
6.8.3	Metódy modelovania ťažbových zásahov.....	333
6.9	Modelovanie rastu stromov a porastov	343
6.9.1	Regresný model rastu.....	343
6.9.2	Multiplikačný model rastu	349
6.9.3	Model redukcie rastového potenciálu.....	351
6.10	Premenné a parametre empirických modelov	354

7	Metódy štruktúrneho modelovania lesných ekosystémov (Fabrika)	365
7.1	Lindenmayerove systémy (L-systémy)	367
7.1.1	Geometrická interpretácia reťazcov	369
7.1.2	Fraktály, rastové gramatiky, morfémy a graftály	370
7.1.3	Bezkontextové deterministické L-systémy	375
7.1.4	Zátvorkové L-systémy	377
7.1.5	Stochastické L-systémy	380
7.1.6	Parametrické L-systémy	381
7.1.7	Kontextovo-senzitívne L-systémy	383
7.2	Modelovanie rastlinných orgánov	385
7.2.1	Modelovanie preddefinovaných plôch	385
7.2.2	Modelovanie vyvíjajúcich sa plôch	387
7.2.3	Modelovanie zložených listov	390
7.3	Modelovanie stromov	391
7.3.1	Získavanie údajov pre konštrukciu rastových gramatík stromov	391
7.3.2	Modelovanie morfológie stromov	395
7.3.3	Modelovanie tropizmov	399
7.3.4	Modelovanie konkurencie a senescencie	400
7.3.5	Modelovanie biometrických veličín stromov	402
7.4	Premenné a parametre štruktúrnych modelov	404
8	Metódy procesného modelovania lesných ekosystémov (Fabrika)	411
8.1	Modelovanie príjmu slnečného žiarenia	414
8.1.1	Slnečná trajektória	414
8.1.2	Slnečná radiácia	416
8.1.3	Absorpcia slnečného žiarenia	419
8.2	Modelovanie pohybu vody	424
8.2.1	Hydrologická bilancia	424
8.2.2	Intercepcia	425
8.2.3	Transpirácia	425
8.2.4	Pôdna evaporácia	427
8.2.5	Povrchový a podpovrchový odtok	428
8.3	Modelovanie pôdnych procesov	429
8.3.1	Vlhkosť pôdy, vodný potenciál a rastlinám prístupná voda v pôde	429
8.3.2	Cyklus živín a dostupnosť živín v pôde	430
8.4	Modelovanie asimilácie	431
8.4.1	Energetická bilancia listu	432
8.4.2	Vodivosť prieduchov	434
8.4.3	Fotosyntéza	436
8.5	Modelovanie disimilácie	442
8.5.1	Respirácia	442
8.6	Modelovanie alokácie	443
8.6.1	Empirický model alokácie	444
8.6.2	Alometrický model alokácie	444
8.6.3	Model teleonomickej (funkčnej) rovnováhy	445
8.6.4	Model metabolickej nádrže	446
8.6.5	Proporcionálny model prameňa a výlevky	446
8.6.6	Model na princípoch rezistencie transportu	446
8.6.7	Model mechanických obmedzení	447
8.6.8	Teória Pipe-model	448



8.7	Modelovanie fenologických fáz, senescencie a mortality	449
8.8	Premenné a parametre procesných modelov	453
9	Metódy vizualizácie lesa (Fabrika)	463
9.1	Strom ako objekt v priestore	465
9.2	Dvozmerný priestor	466
9.3	Trojzmerný priestor	467
9.4	Vizualizácia lesa pomocou kriviek a plôch	469
9.4.1	Analytické krivky a plochy	469
9.4.2	Interpoláčn� a aproximačné krivky a plochy	473
9.5	Projekčné metódy transformácie obrazu z 3D priestoru do 2D priestoru	476
9.5.1	Rovnobezn� premietanie	477
9.5.2	Stredov� (perspektívne) premietanie	479
9.5.3	Projekčná metóda „rybieho oka“ („fish eye“)	480
9.5.4	Maliarov algoritmus	481
9.6	Projekčné metódy transformácie obrazu z 2D priestoru do 3D priestoru	482
9.6.1	Kubick�, cylindrick� a sf�rick� projekcia	482
9.6.2	Stereoskopia a trojzmerný obraz	483
9.7	Virtuálna realita	486
9.7.1	Princíp virtuálnej reality	486
9.7.2	VRML ako univerzálny jazyk	487
9.7.3	Vizualizácia lesného porastu vo virtuálnej realite	492
9.8	Špecializovan� nástroje na vizualizáciu lesa	493
10	Po�ita�om podporovan� modelovanie lesa (Fabrika a Pretzsch)	509
10.1	Progresívne metódy ziskavania údajov o lese	513
10.1.1	Po�ita�om podporovaný ter�nný zber údajov	513
10.1.2	Pozemn� laserov� skenovanie	518
10.1.3	Metódy diaľkového prieskumu Zeme	522
10.2	Rela�n� d�tov� model lesa	527
10.3	Objektov� funk�n� model lesa	529
10.4	Znalostn� a expertn� systém v modelovaní lesa	531
10.5	D�tov� sklad a clearinghouse v modelovaní lesa	534
10.6	Geografick� informa�n� systém v modelovaní lesa	538
10.7	Programovanie modelov lesa	543
10.8	Metódy vysokovýkonného po�itania v modelovaní lesa	548
10.9	Pokro�il� techniky vizualizácie lesa	551
	Literatúra	559
	Register	595





PREDHOVOR

Súčasný život je poznačený rýchlym životným tempom. Do značnej miery sa o to zapríčinil aj rozvoj technológií. Dnes dokáže človek v krátkom čase uskutočniť veci, ktoré by v nedávnej dobe trvali radovo desaťnásobne až stonásobne dlhšie, alebo by ich uskutočnenie bolo nereálne vďaka technickým alebo vedomostným limitom. Technické limity dnes potiera hlavne výpočtová technika a vedomostné bariéry rúca predovšetkým internet a rozvoj informačných a komunikačných prostriedkov. Keď mi rodičia kúpili ako študentovi prvého ročníka Lesníckej fakulty v roku 1990 môj prvý osembitový mikropočítač typu Didaktik Gama vyrábaný vo vtedajšom Československu, oslovil ma programovací jazyk Basic. Okamžite som sa pokúsil o prvé riadky zdrojového kódu, aj keď som sa predtým s programovaním nikdy nestretol. Vyrobil som počítačový program na automatické riešenie zadaní úloh z predmetu „Štatistické metódy v lesníctve“, ktorý sa orientoval na regresnú a korelačnú analýzu pre lineárny a polynomický regresný model. Bol som veľmi hrdý, keď som mohol spolužiakom pomáhať pri riešení ich zadaní. Dokonca mi ani neprekážalo, že skôr ako sa pustím do práce, musím rozložiť počítač, pripojiť ho k televízoru a k magnetofónu a čakať až sa z magnetofónovej pásky načíta môj program aj so zdrojovým kódom. Bolo to vtedy nepraktické, aj keď dnes to zaváňa istou nostalgiou. Vtedy som si uvedomil, že by som veľmi rád využil možnosti počítačov v riešení lesníckych problémov. To poznačilo aj moju diplomovú a neskôr aj dizertačnú prácu. Už na vysokej škole som si predstavoval, aké by to bolo, keby počítače dokázali prognózovať vývoj lesa, vrátane jeho vizualizácie. Vtedy som to považoval skôr za predmet literatúry „science-fiction“. Avšak časom, ako som sledoval rozvoj výpočtovej techniky, ktorú som mimochodom pravidelne „upgradeoval“, uvedomil som si, že to nie je až také nemožné, a že sa môžem toho dožiť aj počas môjho aktívneho veku. Zlom nastal po dokončení mojej dizertačnej práce. Vďaka mojim skúsenostiam s programovaním v jazyku Delphi a s databázovým systémom Microsoft Access, som sa dostal do kolektívu profesora Hansa Pretzsch. Za to, že som mohol pracovať v tomto inšpiratívnom tíme vďaka pre-



dovšetkým Dr. habil. Jánovi Ďurskému, ktorý bol vedúcim mojej diplomovej práce a v tom čase sa podieľal na vývoji rastového modelu SILVA vo Freisingu na terajšej Technickej univerzite v Mníchove. Vďaka nemu a odporúčaniam od profesora Štefana Šmelka, vedúceho mojej dizertačnej práce, som sa stal výskumným pracovníkom na dobu deviatich mesiacov. Vo Freisingu som definitívne pochopil, že neexistujú žiadne bariéry pre modelovanie a vizualizáciu rastu lesa na počítači, a že to je práve to, čomu by som sa chcel venovať. Moju prácu v tejto oblasti podporilo aj neskoršie ročné vedecké štipendium Alexandra von Humboldta na Univerzite Georga Augusta v Göttingene, kde som v kolektíve profesora Branislava Slobodu dokončil svoju habilitačnú prácu na tému slovenského rastového simulátora a modelovania lesa.

Za rozvoj počítačom podporovaného modelovania lesa v slovenských podmienkach a za vznik rastového simulátora SIBYLA vďačím značne dávke šťastia na stretnutie tých správnych ľudí za tých správnych okolností. Na prvom mieste je to prof. Hans Pretzsch, ktorý ma oslovil svojím systémovým prístupom. Ďalej je to prof. Štefan Šmelko, ktorý ma ovplyvnil svojím metodickým prístu-

pom a napokon prof. Branislav Sloboda, ktorý má usmernil svojím algoritmickým prístupom. Hans Pretzsch ma oboznámil s modelovaním lesa a výsledky práce jeho tímu si nesmierne vážim, považujem ich za smerodajné a inšpiratívne a vďačím mu za to, že môžem rozvíjať jeho vedeckú školu na Slovensku. Vedecká škola Štefana Šmelka mi zase vstúpila zásady a postupy metodologickej vedeckej práce založenej na kvantitatívnych metódach a štatistickom vyhodnotení údajov s adekvátnou interpretáciou a zhodnotením presnosti výsledkov. Tretia vedecká škola Branislava Slobodu ma usmernila v nazeraní na vedecké problémy cez prizmu algoritmov, tak aby zodpovedali riešeniu daného problému, a aby boli z hľadiska výkonnosti optimálne.

Dnes je poznanie v oblasti modelovania lesa také bohaté, že sa na univerzitách a vysokých školách zavádza aj do výučby. Výsledky výskumu vo forme rastových modelov sa zasa implementujú do praxe. Na Technickej univerzite vo Zvolene sa zaviedol samostatný predmet s názvom „Počítačom podporované modelovanie lesa“. Na prednáškach sa prezentujú najmodernejšie poznatky z tejto oblasti a na cvičeniach sa využíva rastový model SIBYLA. Vedomosti a rastový simulátor sa integrujú aj do výučby na Českej zemědělskej univerzite v Prahe a do výučby na Mendelovej univerzite v Brne v podobe pozývaných prednášok a cvičení. Problematika modelovania lesa je veľmi dynamická a takisto veľmi široká: empirické prístupy, procesné prístupy, štrukturálne prístupy. Vzhľadom na to, že je podľa mojich skúseností hlad po týchto vedomostiach podporený absolútnym nedostatkom tejto literatúry v slovenskom alebo českom jazyku, požiadal som prof. Hansa Pretzscha o spoluautorstvo tejto monografie v slovenskom jazyku. Dôvod spočíval v tom, že jeho monografie v nemeckom jazyku „Modellierung des Waldwachstums“ a „Grundlagen der Waldwachstumsforschung“ a jeho monografiu v anglickom jazyku „Forest Dynamics, Growth and Yield“ považujem za najkomplexnejšie a najaktuálnejšie v oblasti analýzy a modelovania lesných ekosystémov.

Kniha, ktorú držíte v ruke, sa preto opakovane odkazuje na obsah hore uvedených publikácií Hansa Pretzscha. Za jeho ústretovosť sa chcem touto cestou úprimne poďakovať.

Monografia „Analýza a modelovanie lesných ekosystémov“ vznikla vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj pre projekt: Centrum excelentnosti: Adaptívne lesné ekosystémy, ITMS: 26220120006, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja. Jednou z aktivít projektu je modelovanie rastových procesov lesných ekosystémov. Publikácia sa pokúša o komplexný prehľad z tejto oblasti. Poznatky tak uvoľňuje pre širokú verejnosť, predovšetkým študentov, vedcov a výskumných pracovníkov ako aj zástupcov lesníckej a ekologickej praxe. Publikácia je orientovaná na slovenskú a českú čitateľskú obec, pričom využíva odkazy aj na nemecké a rakúske podmienky ako krajín s vysokým stupňom rozvoja modelovania lesa a príbuznosťou produkčných pomerov. Za vznik publikácie vďačím aj kolektívu odborníkov z príbuzných oblastí, ktorí sa podieľali na odborných korekciách textov. Z mnohých spomeniem v abecednom poradí bez titulov: Eriku Gömöryovú, Jaroslava Kmeťa, Daniela Kurjaka, Jána Merganiča, Katarínu Merganičovou, Róberta Sedmáka, Lubomíra Scheera a Katarínu Střelcovú. Za ilustrácie vďačím kolegovi Borisovi Beláčkovi a za grafickú úpravu Stanovi Jendekovi. Na čistotu jazyka dozerala v rámci jazykových korektúr moja manželka Mária Fabriková. Takisto sa chcem poďakovať za lektorské posudky Jánovi Koubovi, Branislavovi Slobodovi a Štefanovi Šmelkovi, ktorí pomohli vylepšiť odbornú úroveň monografie. Moja vďačnosť patrí aj všetkým mojim kolegom z katedry, ktorí ma odbremenili od inej práce a dali mi tak priestor po dobu dvoch rokov na vznik tejto knihy. Rovnaká vďaka patrí aj mojej rodine za ústretovosť a trpezlivosť.

Zvolen, marec 2011

Marek Fabrika

Študenti lesníctva a ďalší, ktorí sa zaujímajú o lesný ekosystém, sa topia v informáciách. Je to dôsledok prevládajúceho redukcionizmu, ktorý sa dostáva hlbšie a hlbšie a zaplavuje nás udivujúcimi a často až dych vyrážajúcimi mozaikovitými kúskami faktov. Avšak väčšie množstvo informácií nemusí hneď znamenať lepšie porozumenie štruktúry a fungovania lesného ekosystému ako celku. Hojnosť jednotlivých informácií môže dokonca viesť k tomu, že pre stromy nevidíme les. Porozumenie je viac ako len zhromažďovanie informácií a faktov. Systémové pochopenie začína, keď sa kúsky mozaiky spoja, keď sa redukcionizmus integruje s holistickým myslením. Porozumenie a systémová znalosť sa vytvára, keď sa množstvo informácií a faktov zorganizuje do koncepčného modelu ekosystému, do biometrickeho alebo dokonca simulačného modelu, ktoré predstavujú hypotézu o štruktúre a správaní sa systému. Vzhľadom k objavujúcim sa systémovým vlastnostiam sa zo systému stáva viac ako len súhrn mozaikových kúskov. Táto kniha odhaľuje prístupy, ako sa za pomoci metód ekosystémovej analýzy a tvorby modelu prepracovať od mozaikovitých informácií k poznaniu systému. Sme veľmi vďační Európskej únii. Financovaním



zostavenia knihy v slovenskom jazyku sa prekoná západno-východná jazyková bariéra a posilní sa medzinárodná spolupráca v lesníckej vede.

Freising-Weißenstephan, september 2011

Hans Pretzsch



ÚVOD

Od tradičných pravidiel k potvrdeným vedomostiam

„História vedy ukazuje na každom kroku, že jednotlivé osobnosti mali pravdivejšie názory než celé vedecké spoločnosti alebo stá a tisíce vedcov, ktorí sa držali prevládajúcich názorov...“

V. I. Vernadskij

Lesy majú životnosť, ktorá spravidla presahuje trvanie profesionálnej dráhy jednotlivého výskumníka. Majú tiež rôzne stanovištné podmienky a z nich vyplývajúci rôzny priebeh rastových procesov, ktorý znemožňuje zovšeobecnenie výsledkov z jednotlivých lokálnych pokusov. Tieto vlastnosti lesov sťažujú ich experimentálne skúmanie a vyžadujú vlastné pokusné metódy, ktoré v časovej a priestorovej škále presahujú štandardné metódy fyziky, medicíny alebo poľnohospodárstva. Metódy plánovania a vyhodnocovania pokusov popisované v štandardných publikáciách COCHRAN a COX (1957), JEFFERS (1960), LINDER (1953), MUDRA (1958), MUNZERT (1992), RASCH et al. (1992), WEBER (1980) preto môžu byť použité pri riešení otázok lesníckej vedy len v obmedzenom rozsahu.

Prezieravé výskumnícke osobnosti ako FRANZ VON BAUR, BERNHARD DANCKELMANN, ERNST EBERMAYER, AUGUST VON GANGHOFER, KARL GAYER, CARL HEYER, GUSTAV HEYER, FRIEDRICH JUDEICH a ARTHUR VON SECKENDORFF-GUDENT navrhli v 60-tych a 70-tych rokoch 19. storočia odbornú a organizačnú bázu pre skúmanie rastových a produkčných procesov v dlhodobých časových rozpätiach a rozsiahlych pokusných oblastiach (obrazová galéria 1). Názory, ktoré dovtedy pochádzali prevažne z pozorovaní a praktických skúseností, mali byť doplnené resp. nahradené opakovanými meraniami na dlhodobých pokusných plochách. Na základe činnosti menovaných zakladateľov lesníckeho výskumu vznikali

od roku 1870 prvé lesnícke pokusné ústavy, okrem iného v Bádensku, Bavorsku, Prusku, Sasku a Württembersku. Tieto a ďalšie založené pokusné ústavy sa zorganizovali v nasledujúcich rokoch do Zväzu nemeckých lesníckych pokusných ústavov, ktorý sa zameriaval na podporu lesníckeho výskumu prostredníctvom štandardizácie pracovných postupov, zjednocovania metód, rozdelenia prác a spoločných vyhodnotení a publikácií. Zo Zväzu nemeckých lesníckych pokusných ústavov vyplynul v roku 1892 vznik Medzinárodného zväzu lesníckych pokusných ústavov. Menované osobnosti výskumu tým pripravili založenie **Medzinárodného zväzu lesníckych výskumných organizácií (IUFRO)** v roku 1929 a **Zväzu nemeckých lesníckych výskumných ústavov** v roku 1951.

Od založenia prvých dlhodobých pokusných plôch v 60-tych a 70-tych rokoch 19. storočia vyvinula lesnícka veda za takmer 150 rokov špecifické spektrum metód pre plánovanie pokusov, ich zakladanie a usmerňovanie, bez ktorých nie je možný výskum rastových procesov v lese a zásobovanie lesného hospodárstva potvrdenými vedomosťami. Mnohé z nasledujúcich príkladov sa odvolávajú na sieť pokusných plôch v Bavorsku, ktorá v súčasnosti zahŕňa 147 pokusov s 878 parcelami a 147 ha meranej plochy (k 1. 1. 2000). Porovnateľné pokusy čo do dĺžky trvania a počtu plôch existujú iba na výskumných ústavoch v Eberswalde, Freiburgu a Göttingene. To, že na mnohých krajiniských les-

nických výskumných ústavoch až dodnes existuje tradičné oddelenie produkčných pokusov, a toto je často stotožňované s lesníckym výskumom, je dôsledok špecifickej histórie vzniku lesníckeho výskumu, ktorý začal organizáciou dlhodobých pokusných plôch v polovici 19. storočia.

Dlhá životnosť a stanovištná pestrosť lesov viedli už v 19. storočí opakovane k nekritickejmu preberaniu a využívaniu domnelých praktických vedomostí. Na základe dlhej doby reakcie lesov na usmerňovacie zásahy, ako je napr. voľba východiskového sponu alebo prebierkového programu, nemohli praktici postrehnúť dlhodobé dôsledky ich zásahov. Skúsenosti a hypotézy tak boli už len z dôvodu rozličnej časovej škály sotva overiteľné. Okrem toho mohli byť lokálne získané skúsenosti o raste lesa kvôli regionálne obmedzenému poľu pôsobnosti lesného praktika len zriedkavo potvrdené aj niekde inde. Praktici mali preto sklon k neodôvodnenému zovšeobecňovaniu svojich lokálne získaných praktických vedomostí. Kliše, že desať praktikov pestovateľov, ak sú konfrontovaní v jednom poraste s jednou pestovateľskou úlohou, bude mať prinajmenšom desať rôznych názorov na to, ako najlepšie dosiahnuť zadaný cieľ, bolo výsledkom tvrdošíjného zotrúvania na domnelých praktických skúsenostiach. AUGUST VON GANGHOFER – bavorský kráľovský lesný úradník a zakladateľ produkčného výskumu v Bavorsku k tomu poznamenáva. „... praktik nevráživo hľadí na každého, kto sa odváži uplatňovať vlastné názory založené na teoretických vedomostiach a kde-tu vyhlásiť vojnu pravidlám založeným na skúsenostiach a prenášaným dogmaticky z generácie na generáciu. Niektorí hundraši dokonca svojho času pohrdavo krčili nosom, keď sa G. L. Hartig pokúsil vo svojej učebnici pre lesníkov prvýkrát vydanéj v roku 1791 len systematicky predstaviť pestovateľské pravidlá, ktoré boli dovtedy uznávané za správne, či lepšie povedané, len sa verilo, že správne sú.“ AUGUST VON GANGHOFER tým obhajuje systematický výskum rastu lesa na kvantitatívnom základe v dlhodobých pozorovacích obdobiach a s nadregionálnym rozšírením pokusných plôch, zároveň podporuje zakladanie výskumných inštitúcií, ktoré by boli schopné zvládať takéto úlohy. Vo svojej knihe „Lesnícky výskum“ z roku 1877 ukazuje cestu pre systematické rozširovanie vedomostí o raste lesa prostredníctvom dlhodobých vedeckých pokusov. Ak sa výskum obmedzí len

na krátky úsek vývoja porastu v špecifických stanovištných podmienkach, potom vzniká nebezpečenstvo unáhlených záverov a neprípustných zovšeobecnení.

Prikladom je provenienčný pokus borovice Schwabach 304 založený v roku 1927. Pri pozorovaní do veku 50 rokov vykazoval zaostávanie v celkovej produkcii pre provenienciu Bamberg. Až pokračovanie pokusu do vyššieho veku odhalilo neskoršiu prevahu tejto proveniencie nad provenienciami Schwabach a Unterfranken. Ak by sa pokus ukončil po 50 rokoch, nebolo by možné odhaliť pozoruhodnú produkčnú prevahu všetkých proveniencií oproti WIEDEMANNOVÝM rastovým tabulkám pre borovicu (1943), ani dlhodobé zmeny v poradí jednotlivých proveniencií podľa rastového výkonu. Napriek pozorovaniu až do rubného veku poskytuje tento pokus možnosti zovšeobecnienia o vhodnosti testovaných proveniencií borovice len ako súčasť stanovištne variabilnej série pokusov. Ako bolo zvyčajné v čase vzniku lesníckeho výskumu, aj v provenienčnom pokuse Schwabach 304 mali varianty len jedno opakovanie, takže nie je možné žiadne štatistické overenie výsledkov.

Od potvrdených vedomostí k modelom lesa

„Experimentálna veda nás neustále stavia pred nové vlastnosti procesov v prírode a pri ich výskume musíme vymýšľať nové spôsoby myslenia ...“

C. Maxwell

Lesný ekosystém je dynamický systém, ktorého vývoj a zmeny podliehajú veľkému počtu biologických, ekologických a socio-ekonomických faktorov. Nie je preto zvláštnosťou, že jeho zložitosť priťahuje pozornosť lesníckej vedy. Tá sa neustále snaží o prevedenie rastových procesov do sústavy rastových zákonitostí a matematických algoritmov. Tieto snahy pritom neboli a nie sú samoúčelné, ale sledujú využitie pre praktické účely. Lesnícka a ekologická veda a prax potrebuje predpovedať dopad rôznych vonkajších a vnútorných zásahov do lesných ekosystémov. Potrebuje stanoviť mieru ich zmeny, resp. narušenia pod vplyvom rôznych faktorov. Faktory môžu mať vnútorný pôvod. Napríklad veková a priestorová štruktúra ekosystému predstavujú vnútorné faktory, ktoré ovplyvňujú konkurenčné

**Severné Nemecko:**

Bernhard Danckelmann
* 1831 † 1901



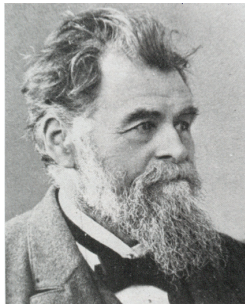
Adam Schwappach
* 1851 † 1932



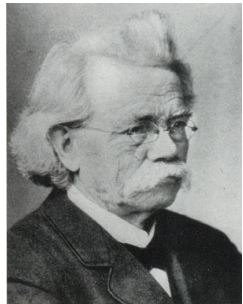
Eilhard Wiedemann
* 1891 † 1950



Reinhard Schober
* 1906 † 1998

Južné Nemecko:

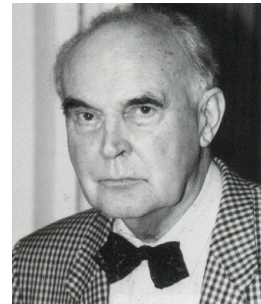
August von Ganghofer
* 1827 † 1900



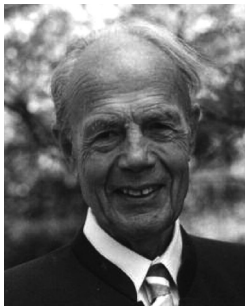
Franz von Baur
* 1830 † 1897



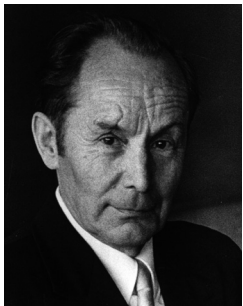
Ernst Assmann
* 1903 † 1979



Friedrich Franz
* 1927 † 2002

Južné Nemecko:

Gerhard Mitscherlich
* 1911 † 2007



Michail Prodan
* 1912 † 2002

Česko a Slovensko:

Václav Korf
* 1907 † 1985



Ján Halaj
* 1919 † 1997

Obr. 1 Galéria zakladateľov výskumu modelovania lesa (foto: archívy Dolnosaského výskumného ústavu v Göttingene, Ústavu lesnej krajiny v Eberswalde, Katedry náuky o raste lesa na Technickej univerzite v Mníchove, Inštitútu rastu lesa na Univerzite Alberta Ludwiga vo Freiburgu, Katedry hospodárskej úpravy lesov na Českej zemědělskej univerzite v Prahe a Lesníckeho výskumného ústavu na Národnom lesníckom centre vo Zvolene).



a mortalitné vzťahy. Podobným vnútorným faktorom je genetická štruktúra, ktorá ovplyvňuje rastové schopnosti a vitalitu zložiek ekosystému. Faktory majú však aj vonkajší pôvod. Napríklad stav okolitého prostredia vo forme klimatických, pôdnych a iných faktorov prostredia, ktoré ovplyvňujú dynamiku vývoja lesného ekosystému a v extrémnych prípadoch môžu vyústiť aj do jeho kalamitného narušenia. Rovnaký dopad môžu mať aj antropogénne faktory vo forme zásahov človeka do lesného prostredia.

Prvým pokusom o zavedenie kvantifikácie vplyvu faktorov bolo vytvorenie bonitácieho systému, ktorý sa snažil priamym alebo nepriamym spôsobom agregovať vplyv vonkajších faktorov prostredia na rast lesa. Bonitácia je integrálnou súčasťou prvých ucelených rastových modelov tzv. **rastových tabuliek**. S viac ako 200-ročnou históriou sú rastové tabuľky pre rovnoveké porasty najstaršími modelmi v lesníckej vede a praxi. Zachytávajú rast lesných porastov za obdobie dlhšie ako ich rubná doba a opierajú sa o dlhodobé sledovania na výskumných plochách. Od konca 18. až do polovice 19. storočia vypracovali okrem iných PAULSEN (1795), VON COTTA (1821), HARTIG (1868), HEYER (1852), HUNDESHAGEN (1825) a JUDEICH (1871) na pomerne malej empirickej základni **prvú generáciu rastových tabuliek**, ktorá je ešte poznačená zbieraním skúseností. Tieto tabuľky ale zodpovedali na široké spektrum vedeckých problémov a odštartovali etapu intenzívneho zakladania trvalých výskumných plôch. Typickým príkladom takýchto tabuliek z oblasti Slovenska sú FEISTMANTELOVE rastové tabuľky (1854), ktoré bonitujú lesné porasty podľa popisu stanovišťa.

Druhú generáciu rastových tabuliek je možné datovať od konca 19. do polovice 20. storočia a charakterizovať orientáciou na jednotné princípy konštrukcie, ktoré v roku 1874 a 1888 odporučil Zväz nemeckých lesníckych výskumných ústavov. Zároveň je možné povedať, že tieto tabuľky už boli postavené na solídnej empirickej úrovni. K protagonistom tejto generácie rastových tabuliek patria WEISE (1880), VON GUTTENBERG (1915), VANSELOW (1951), KRENN (1946), GRUNDNER (1913) ale predovšetkým SCHWAPPACH (1893), WIEDEMANN (1932) a SCHOBER (1967) /pozri obrazovú galériu 1/, ktorých tabuľky na seba koncepcie nadväzujú a niektoré sa používajú aj

v súčasnosti. Na Slovensku sa napríklad táto generácia rastových tabuliek v podobe upravených SCHWAPPACHOVÝCH rastových tabuliek používala do roku 1992.

V 30-tych a 40-tych rokoch vznikli pod vedením WIEDEMANN prvé rastové tabuľky pre zmiešané porasty. Na základe empirického materiálu z viac ako 200 výskumných plôch Pruského výskumného ústavu boli konštruované známe **rastové tabuľky pre zmiešané rovnoveké porasty** borovice a buka (BONNEMANN 1939), smreka a buka (WIEDEMANN 1942) a duba a buka (WIEDEMANN 1939). Ďalšie výskumné aktivity v tejto oblasti bol WIEDEMANN kvôli II. svetovej vojne nútený prerušiť. Tieto práce už ale predstavujú začiatok systematického výskumu v zmiešaných porastoch. Rastové tabuľky zmiešaných porastov tejto generácie však pre obmedzenie platnosti len na definované stanovišťa, typ a charakter zmiešania nenašli v lesníckej praxi žiadne uplatnenie.

Rastové tabuľky od GEHRHARDA (1923, 1930) z 20-tych rokov minulého storočia uvádzajú **treťiu generáciu rastových tabuliek**, ktorých modely nemajú len empirický charakter, ale sú aj teoreticky odôvodnené a biometricky formulované. Jadrom týchto modelov (napr. ASSMANN a FRANZ 1963 /pozri obrazovú galériu 1/, HAMILTON a CHRISTIE 1973, VUOKILA 1966, SCHMIDT 1971, LEMBCKE et al. 1975 a na Slovensku HALAJ et al. 1987 a PETRÁŠ et al. 1990) je flexibilný systém rovníc, ktorý sa opiera o osvedčené rastové zákonitosti a môže fungovať aj ako počítačový program.

Vznikom **porastových simulátorov** (FRANZ 1968, HOYER 1975, HRADEZKY 1972, BRUCE et al. 1977, CURTIS 1981 a 1982) na konci 60-tych rokov možno datovať začiatok štvrtej generácie rastových modelov. Tieto umožňujú pre zvolené rastové podmienky, východiskový počet stromov v poraste a pestovateľský režim prognózovať vývoj lesných porastov.

Aj napriek všetkým nedostatkom predstavujú rastové tabuľky až dodnes základ pre plánovanie v lesníctve, ktoré vychádza z princípov trvalosti. K postaveniu rastových tabuliek v kontexte náuky o raste lesa a lesníctva PRODAN (1965, strana 605) poznamenáva: „*Je nepochybné, že konštrukcia rastových tabuliek bola doposiaľ najvýraznejším a najpozitívnejším výkonom lesníckej vedy. Táto skutočnosť neznižuje ani poznatok, že rastové*

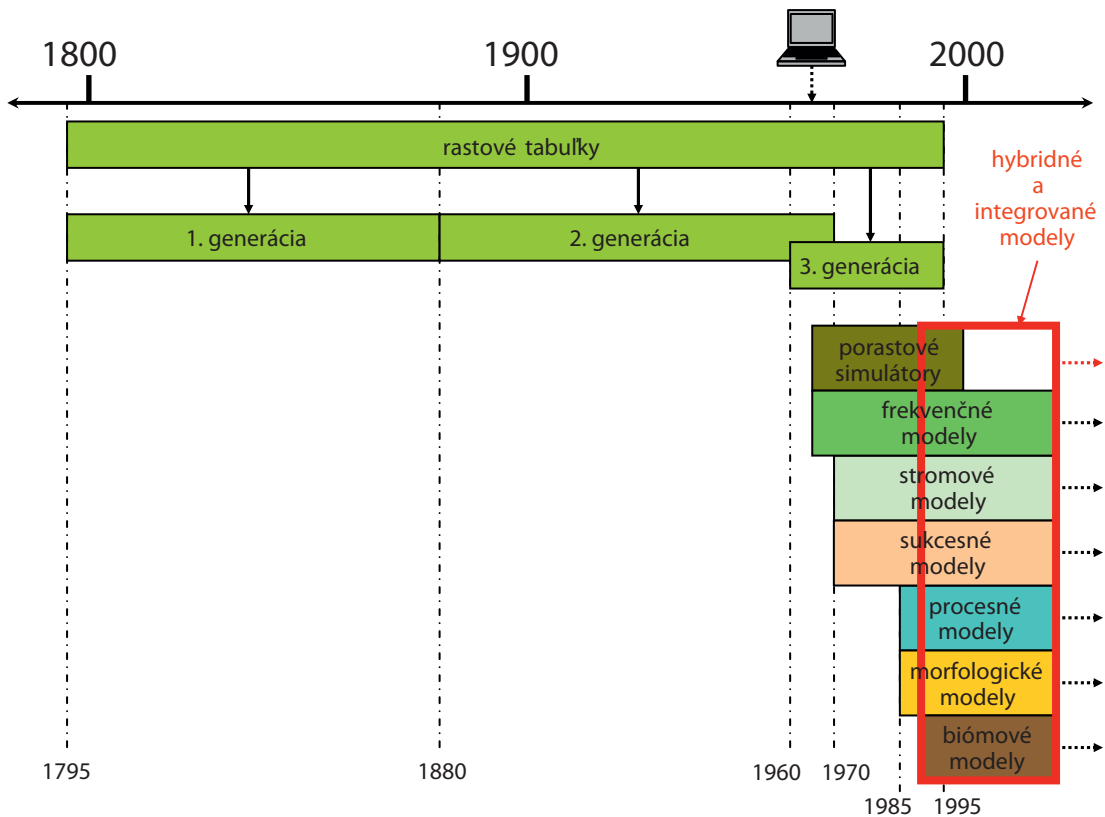
tabuľky budú v budúcnosti slúžiť len na účely porovnávania.“

Na konštrukciu rastových tabuliek, podnietenú predovšetkým v nemecky hovoriacich krajinách, nadväzuje od 60-tych rokov modelovanie rastu lesa na základe **frekvenčných modelov** (MOSER 1972 a 1974, CLUTTER 1963, ale aj SLOBODA 1976, SUZUKI 1971, VON GADOW 1987, BOUNGIORNO a MICHIE 1980), na základe **stromových modelov** (ARNEY 1972, BELLA 1971, EK a MONSERUD 1974, MITCHELL 1969 a 1975, MONSERUD 1975, NEWNHAM 1964, WYKOFF et al. 1982), tzv. **procesných modelov** (BOSEL 1994, MÄKELÄ a HARI 1986, MOHREN 1987, PFREUNDT 1988, HOFFMANN 1995, HAUHS et al. 1995), **sukcesných modelov** (BOTKIN et al. 1972, SHUGART 1984, PASTOR a POST 1985, LEEMANS a PRENTICE 1989, KIENAST a KRÄUCHI 1991, KELLOMÄKI et al. 1993), **dendroklimatických modelov** (FRITTS 1978, SCHWEINGRUBER 1983), **biomových modelov** (BOX a MEENTEMEYER 1991, PRENTICE et al. 1992) a **morfologických modelov** (BELL et al. 1979, BOREL-DONOHUE 1988, KURTH 1999). Ani jeden z týchto „čistých“ prístupov však nenašiel pre riešenie praktických potrieb lesného hospodárstva širšie uplatnenie.

V Európe boli preto KOLSTRÖMOM (1993), NAGELOM (1996), PRETZSCHOM (1992), PUKKALOM (1987), HASENAUEROM (1994) a STERBOM (1995) vyvinuté tzv. **hybridné modely**, ktoré spájajú výhody viacerých vyššie uvedených prístupov. Základom je však stromový model, ktorý umožňuje hodnotiť rastovú konšteláciu jednotlivého stromu a na tomto základe je možné predpovedať jeho budúci vývoj. Preto sa veľmi často označujú aj ako **stromové rastové simulátory**. Tieto modely sa okrem spomínaného stromového prístupu vyznačujú aj stanovíštnou citlivosťou, možnosťou generovať východiskovú situáciu lesného porastu, ak táto nie je známa, a schopnosťou simulovať rôzne výchovné opatrenia. Okrem toho sa opierajú o širokú empirickú bázu a ich výstup nie je orientovaný len na oblasť produkčnú, ale aj ekologickú a ekonomickú. Práve pre tento rozsah výstupov sú nezriedka nazývané aj ako **manažérske modely**. Súčasným trendom v rozvoji modelov lesa sú teda hybridné a integrované modely, ktoré sa snažia o čo najväčšie splynutie alebo kombináciu rôznych princípov a prístupov modelovania (pozri kapitolu 5). Východiskom je väčšinou les-

ný porast, frekvenčné rozdelenie stromov alebo jednotlivý strom, pričom sa prevádza „**downscale**“ na nižšie úrovne (napríklad orgány a pleťivá stromov) a „**upscale**“ na vyššie úrovne (napríklad sukcesia ekosystému, krajina a bióm). Miešajú sa pritom princípy empirického (kapitola 6), štrukturálneho (kapitola 7) a procesného modelovania (kapitola 8). Z najnovších modelov možno spomenúť napríklad modely BALANCE (GROTE a PRETZSCH 2002), PICUS (LEXER a HOENNINGER 2001), GOTILWA (GRACIA et al. 1999) a GroIMP (KNIEMEYER et al. 2006).

Na obrázku 2 sme sa pokúsili znázorniť rozvoj modelovania lesa na časovej osi. Časová os zobrazuje periódy, počas ktorých sa vyvíjajú jednotlivé typy modelov. Z obrázku je vidieť, aká je postupná „evolučná genéza“ modelovania lesa. Jednotlivé typy modelov sa pritom časovo prelínajú a niektoré pretrvávajú dlhé obdobie. Napríklad rastové tabuľky boli konštruované počas obdobia dvoch storočí. Prvé tabuľky boli vytvorené už v roku 1795, kým posledné tabuľky sa konštruovali do roku 1995. Prvá generácia rastových tabuliek bola nahradená druhou generáciou okolo roku 1880, pričom tá sa vyvíjala zhruba do roku 1970. Od roku 1960 bola postupne nahrádzaná treťou generáciou. S nástupom prvých počítačov okolo roku 1965 prichádza éra porastových simulátorov, ktoré sa prestali vyvíjať zhruba na konci dvadsiateho storočia. Nahrádzajú ich podrobnejšie modely. Sú to frekvenčné modely, ktoré sa vyvíjali paralelne s porastovými simulátormi, ďalej od roku 1970 prichádza éra stromových modelov a sukcesných modelov, od roku 1985 sa intenzívne začínajú rozvíjať procesné a morfologické modely a od roku 1990 moderné biómové modely. Tieto typy modelov sa stále zdokonaľujú a majú pred sebou ďalšiu budúcnosť. Zároveň sa zhruba od roku 1990 prejavujú trendy integrovania a hybridizácie modelov, ktoré sa snažia pokiaľ možno o čo najväčšiu flexibilitu a univerzálnosť. Zo schémy je názorne vidieť, že práve rozvojom výpočtovej techniky sa začína intenzívny rozvoj modelovania lesa a zároveň to dokazuje, že sme ešte len na začiatku dlhej cesty. Pokiaľ rastové tabuľky sa tvorili 200 rokov, moderné typy modelov sú tu menej ako 50 rokov a pravdepodobne ich vývoj nie je ešte na konci cesty. V kapitolách 5 až 8 budeme postupne definovať a rozoberať jednotlivé typy moderných modelov.



Obr. 2 Časová os rozvoja modelov lesa. Rastové tabuľky sa vyvíjajú 200 rokov. Boli postupne nahradené porastovými simulátormi, ktorých vývoj sa skončil zhruba v roku 2000. Dodnes sa vytvárajú hlavne frekvenčné, stromové, sukcesné, procesné, morfologické a biómové modely. Najmodernejšie sú snahy o integráciu a hybridizáciu modelov na zabezpečenie ich flexibility a univerzálnosti. Rozvoj modelov sa naštartoval érou počítačov zhruba od roku 1965.

Záujem o rozvoj rastových modelov lesa sa prejavuje aj vo zvýšenej aktivite a spolupráci vedeckých osobností z viacerých krajín Európy, pričom vznikajú spoločné vedecké projekty na podporu vývoja v oblasti modelovania lesa. Z najvýznamnejších možno spomenúť projekt piateho rámcového programu Európskej únie s akronymom ITM, ktorý v slovenskom preklade znamená „Implementácia stromových rastových modelov v hospodárskej úprave lesa“ a projekt COST FP0603, ktorý má v slovenskom preklade názov „Modely lesa pre podporu rozhodovania a trvalé obhospodarovanie lesa“. Projekt ITM sa riešil v rokoch 2001 až 2004 a na jeho riešení sa podieľalo niekoľko krajín: Rakúsko, Nemecko, Fínsko, Grécko, Dánsko, Portugalsko a Slovensko. Projekt COST FP0603 sa začal v roku 2007 a bude ukončený v roku 2011. Jeho územná pôsobnosť je ešte väčšia, pretože združuje odborníkov z 22 krajín Európy vrátane Slovenska. Výsledky projektov sa prejavujú vo vý-

mene skúseností v modelovaní lesa, vo vytváraní štandardov pre modelovanie lesných ekosystémov, v zjednocovaní vedeckého názvoslovia, v rozvoji samotných modelov a počítačových programov, v ich internacionalizácii a integrácii, vedú k formovaniu trendov, smerov a budúcich výziev v modelovaní lesa ako aj k napĺňaniu medzinárodného registra modelov (<http://www.iefc.net/>).

Tradícia modelovania lesa na Slovensku

Skutočná tradícia nie je prežitkom dávnej minulosti; je to živá sila, ktorá oduševňuje a utvára prítomnosť. Spôsoby sa menia, ale v tradícii sa pokračuje, aby sa tvorilo nové. Tradícia zabezpečuje nepretržitosť vývoja.

I. Stravinskij

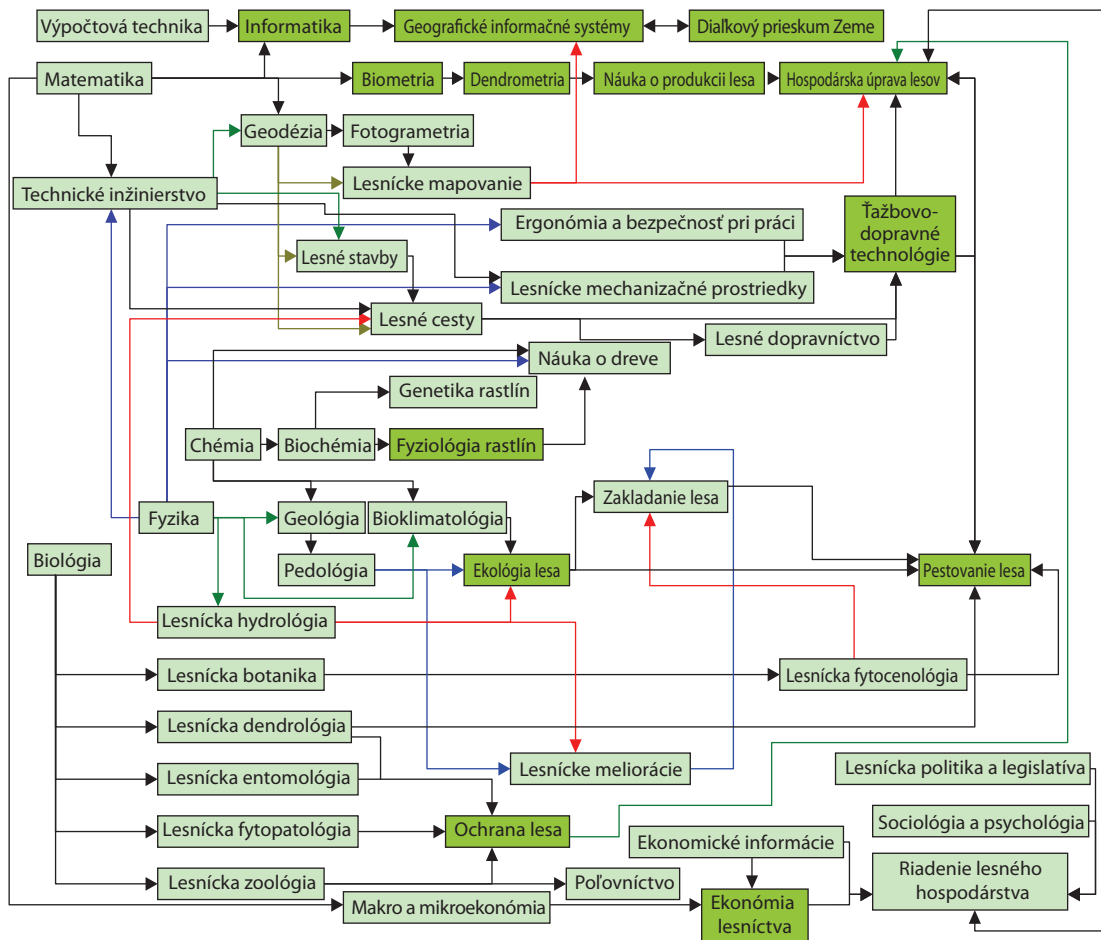
Nemecko založilo bohatú tradíciu v modelovaní lesa, tak ako to bolo predstavené v pred-

chádzajúcom texte. Aj Slovensko má bohatú tradíciu v modelovaní lesa, a to vďaka niekoľkým osobnostiam, ktoré sa o túto tradíciu zaslúžili. Za zakladateľov modelovania lesa na Slovensku možno považovať Václava Korfa, ktorý pôsobil na Lesníckej fakulte Českého vysokého učení technického v Prahe (v bývalom Československu) a na Lesníckej fakulte vysokej školy lesníckej a drevárskej vo Zvolene a Jána Halaju, ktorý pôsobil na Lesníckom výskumnom ústave vo Zvolene (pozri obrazovú galériu 1).

Václav Korf nám zanechal rozsiahle vedecké dielo (pozri články VYSKOT 1977, 1985, ŘEHÁK 1982, KOUBA a ZAHRADNÍK 2005), ktorým výrazne prispel k rozvoju metód dendrometrie, lesníckej biometrie, náuky o produkcii lesa a hospodárskej úpravy lesov. Bol autorom jednej z prvých povojnových vysokoškolských učebníc v týchto odboroch vo svete, čo bolo pozitívne prijaté aj v zahraničí (HUSCH et al. 1963, 1972, KURTH 1994, PARDÉ 1961, PRODAN 1961, 1965, 1968). Vo svojich prácach sa zaoberal teóriou rastu stromov a lesných porastov, využitím diferenciálnych rovníc, lesníckou biometriou, vzťahmi medzi základnými taxačnými veličinami, problémom stanovenia bežného prírastku, spôsobmi hospodárenia v lese a ďalšími otázkami hospodárskej úpravy lesov. Predovšetkým jeho rastová funkcia dosiahla celosvetovú významnosť (KORF 1939). Prameňom mu boli práce RYCHLÉHO (1933), VAN DER VLIETA (1934, 1935, 1937) a KORSUŇA (1935), ďalej PESCHELA (1938), ktorý zhrnul dovtedy známe rastové funkcie, napokon HOHENADLA (1923, 1924) a GUTTENBERGA (1915) a samozrejme GEHRHARDTA (1930), na ktorého rastových tabuľkách si odvodenú rastovú funkciu preskúšal. Svoju rastovú funkciu a teóriu ďalej rozvinul v nadväznej obsiahlej práci. KORF (1967) sa zaoberal tiež problémami asymetrie prírastkovej krivky – prvej derivácie svojej rastovej funkcie – v súvislosti s BACKMANNOVÝMI prácami (1941, 1943) a dokázal, že asymetria prírastkovej funkcie je spôsobená asymetriou hodnôt na osi y , teda tým, že prírastok klesá po svojej kulminácii pomalšie, ako predtým stúpá. Ukázal, že jeho funkcia vyhovuje všetkým požiadavkám, ktoré Backmann stanovil. Backmannove práce pritom patria dodnes k základným v modernej vede, i keď problém existencie organického (resp. biologického) času nebol doposiaľ uspokojivo

vyriešený. Korfova funkcia bola použitá autormi z mnohých krajín sveta. Na základe citačného ohlasu možno bezpečne dokladovať jej využitie v nasledujúcich krajinách: Estónsko, Fínsko, Francúzsko, Írsko, Nemecko, Nórsko, Poľsko, Portugalsko, Rakúsko, Rumunsko, Španielsko, Švédsko, Taliansko, Veľká Británia, Kanada, USA, Mexiko, Kostarika, Francúzska Guyana, Čína a samozrejme, že sa stala aj základom pre modelovanie rastu strednej a hornej výšky ako aj zásoby v česko-slovenských rastových tabuľkách (HALAJ a ŘEHÁK 1979, HALAJ et al. 1981, 1987).

Ján Halaj zanechal počas svojej približne 50-ročnej vedeckej aktivity takisto rozsiahle dielo (pozri články ŠMELKO 1997 a PETRÁŠ 2009), ktorým ešte výraznejšie prispel k problematike modelovania lesa na Slovensku. Hneď v povojnovom období sa pustil do problematiky zisťovania zásob dreva v lesných porastoch z leteckých snímok a jeho poznatky položili základy lesníckej fotogrametrie vo vtedajšom Československu. Okrem príspevku k rozvoju fotogrametrie vyhotovil originálny systém jednotných výškových a objemových kriviek a taríf pre rovnoveké i nerovnovéke porasty (HALAJ 1955). Veľkú pozornosť venoval štúdiu hrúbkovej a výškovej štruktúry lesných porastov (HALAJ 1957 a 1978), pričom odvodil aj modely frekvenčných kriviek hrúbok stromov. Na podklade tejto práce skonštruoval tabuľky na určovanie zásob a prírastku porastov (HALAJ 1963). Zároveň vypracoval viaceré varianty stanovenia objemového prírastku na princípe tarifových diferencií. Preskúmal možnosti uplatnenia matematicko-štatistickej inventarizácie lesa, najmä kruhových skusných plôch v slovenských pomeroch. Osobitne významný je jeho podiel na konštrukcii domácich rastových tabuliek. V rokoch 1965 až 1990 bol vedúcim riešiteľom tohto veľmi dôležitého a dlhodobého výskumného projektu na celoštátnej úrovni bývalého Československa (ČSSR). V súvislosti s tým zorganizoval úzku a efektívnu spoluprácu hospodársko-úpravníckej a prevádzkovej praxe, lesníckych vedeckovýskumných a vysokoškolských pracovísk pri založení a periodicky opakovanom meraní vyše 4 000 výskumných plôch, pri tvorbe metodiky i pri overovaní tabuliek. Sám vyriešil celý rad zložitých problémov rastu a produkcie lesných porastov, ako sú systémy bonitovania (HALAJ a ŘEHÁK 1979), meranie hustoty a zakmenenia porastov, ako aj stanovenie kritického zakmenenia porastov (HALAJ 1985), definovanie sily prebierok (HALAJ et al. 1986), produktivnosť nezmiešaných a zmiešaných porastov, určenie rubnej zrel-



Obr. 3 Systém predmetov štúdia lesného inžinierstva ako teoretické pozadie pre analýzu a modelovanie lesných ekosystémov. Predmety, ktoré majú priamu nadväznosť na modelovanie lesa sú znázornené tmavšou farbou.

ti porastov (HALAJ et al. 1990) a iné. S jeho menom je spojený nový typ rastových tabuliek diferencovaných podľa zásobovej úrovne porastov (HALAJ et al. 1981, 1987).

Rozvoj modelovania rastu stromov a vývoja lesných porastov na Slovensku bol v poslednom období poznačený predovšetkým pôsobením Štefana Šmelka a Rudolfa Petráša, ktorí priamo nadviazali na práce Halaja ako jeho mladší kolegovia a tak dodnes pokračujú v tradícii modelovania lesa. **Štefan Šmelko** prispel predovšetkým k metódam určovania hrúbkového prírastku stromov a porastov (ŠMELKO 1965) a k ďalšiemu rozvoju metód porastovej, podnikovej a národnej inventarizácie lesa (ŠMELKO 1985 a 1990, ŠMELKO et al. 2006), rozvinul metódy lesníckej biometrie

(ŠMELKO 1991) a dendrometrie (ŠMELKO 2007) a zaslúžil sa napríklad aj o matematickú formuláciu niektorých dendrometrických vzťahov, ktoré dodnes pomáhajú pri modelovaní lesa, napríklad matematický model jednotných výškových kriviek (ŠMELKO et al. 1987) alebo matematický model prírastku objemu stredného kmeňa (ŠMELKO a PÁNEK 1985). Pozornosť si zaslúži aj monografia o raste, štruktúre a produkcii lesa (ŠMELKO et al. 1992), ktorá tvorí na Slovensku doterajší vedomostný základ pre empirické modelovanie lesa. **Rudolf Petráš** prispieva dodnes k modelovaniu rastu lesa ako priamy pokračovateľ práce Halaja. Podieľal sa priamo na konštrukcii tretieho vydania rastových tabuliek (PETRÁŠ et al. 1990), na konštrukcii objemových tabuliek (PETRÁŠ a PAJTIK

1991), stromových a porastových sortimentačných tabuliek (PETRÁŠ a NOCIAR 1990, 1991, PETRÁŠ et al. 1995), sortimentačných rastrových tabuliek (PETRÁŠ et al. 1996) a morfológických kriviek tvaru kmeňa (PETRÁŠ 1986, 1989, 1990). Moderné simulačné modely využívané na Slovensku by nemohli existovať bez využitia vedomostí a parciálnych funkcií, vzťahov a algoritmov Korfa, Halaja, Šmelka a Petráša, o čom svedčí napríklad aj rastrový simulátor SIBYLA (FABRIKA 2005) odvodený a vytvorený pre slovenské produkčné a hospodárske podmienky.

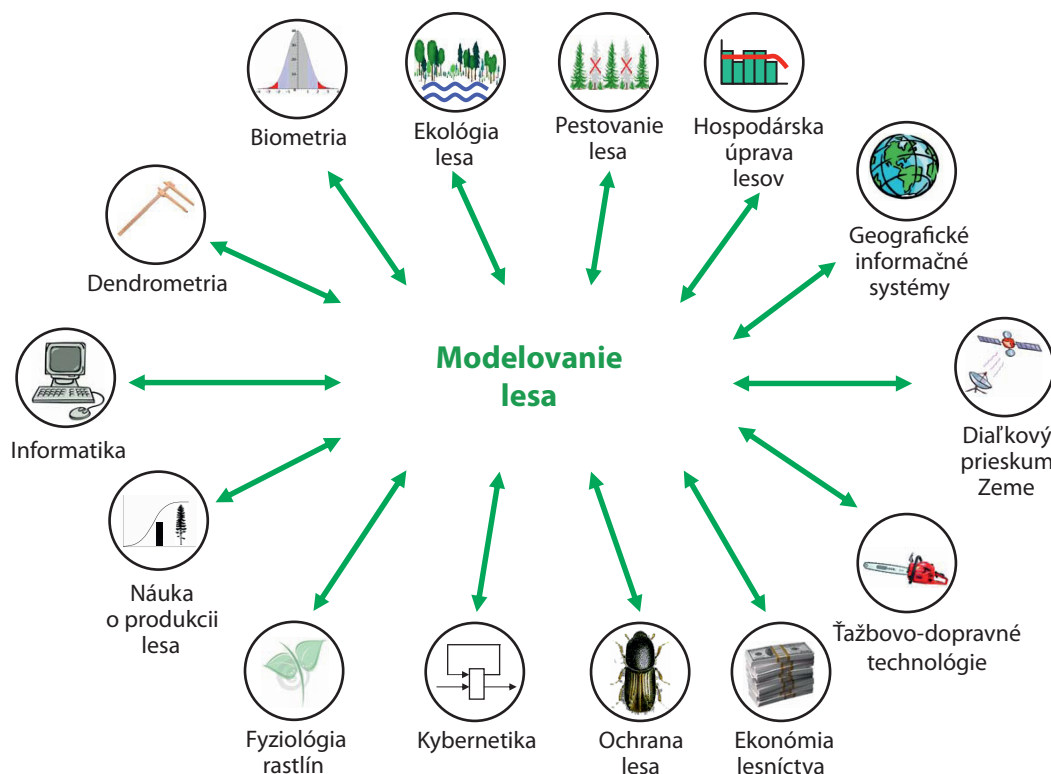
Postavenie modelovania lesa v systéme lesníckych predmetov

„Kto vie málo a o tom vie, ten mnoho pozná.“

D. Stuard

Modelovanie lesných ekosystémov je špecifické svojou multidisciplinárnou povahou. Od štúdia objektu, cez založenie pokusu, jeho

štatistické spracovanie až po odvodenie matematických algoritmov a v súčasnosti už aj vývoju softvérového riešenia na počítači je potrebné absorbovať a využívať poznatky z mnohých vedných disciplín. To isté platí aj o aplikácii modelov pre lesnícke a ekologické účely, ktoré je tiež poznačené širokým rozsahom odborov a oblastí. Aby sme pochopili postavenie modelovania lesa v systéme lesníckych predmetov, predstavíme najprv zoznam odborných disciplín, ktoré by mal zvládnuť študent lesníctva (obrázok 3). Na obrázku 3 je zobrazená paleta predmetov spolu so vzájomnými väzbami a ich nadväznosťami. Schéma vychádza zo systému výučby lesného inžinierstva na Technickej univerzite vo Zvolene, ale väčšina európskych vysokých škôl, ktoré vychovávajú odborníkov v oblasti lesníctva má podobnú štruktúru predmetov. Vzhľadom na povahu lesa ako objektu štúdia a následnej lesnej prevádzky je aj lesný inžinier multidisciplinárne orientovaný človek. Pri štúdiu sa zoberá predmetmi z prírodných vied (biológia,



Obr. 4 Skupina predmetov v priamej nadväznosti na modelovanie lesa. Prospech je obojstranný. Predmety prispievajú ku konštrukcii modelov a modely spätne prispievajú ďalšiemu rozvoju predmetov.

fyzika, chémia, biochémia, matematika), predmetmi o prírodnom prostredí (geológia, pedológia, bioklimatológia, lesnícka hydrológia, ekológia lesa), predmetmi z oblasti lesníckej fytoológie (genetika rastlín, fyziológia rastlín, lesnícka botanika, lesnícka dendrológia, lesnícka fytoocenológia), predmetmi zaoberajúcimi sa fytootechnikou pri obhospodarovaní lesa (lesnícke meliorácie, zakladanie lesa, pestovanie lesa, náuka o produkcii lesa, hospodárska úprava lesov), predmetmi z oblastí mechanizačných technológií (náuka o dreve, lesnícke mechanizačné prostriedky, ergonómia a bezpečnosť pri práci, lesné dopravníctvo, ťažbovo-dopravné technológie), predmetmi z odboru stavebného inžinierstva (technické inžinierstvo, geodézia, fotogrametria, lesnícke mapovanie, lesné cesty, lesné stavby), disciplínami ekonomických vied (makro a mikroekonómia, ekonomické informácie, sociológia a psychológia, lesnícka politika a legislatíva, riadenie lesného hospodárstva), predmetmi zaoberajúcimi sa informatikou lesných zdrojov (výpočtová technika, informatika, geografické informačné systémy, diaľkový prieskum Zeme, biometria, dendrometria) ako aj predmetmi z oblasti manažmentu lesných rizík (lesnícka entomológia, lesnícka fytopatológia, lesnícka zoológia, poľovníctvo, ochrana lesa). V schéme sme sa pokúsili zvýrazniť predmety, bez znalostí kto-

rých by nebolo možné zodpovedne konštruovať modely lesa a predmety, v ktorých je existencia modelov lesa veľmi prínosná z hľadiska ich nasaďenia. Sú zvýraznené tmavšou farbou, pričom sú zároveň samostatne zobrazené aj na obrázku 4. Väzby predmetov na modelovanie lesa sú obojstranné, pretože znalosti z predmetov na jednej strane prispievajú ku konštrukcii modelov a naopak modely prispievajú na druhej strane ďalšiemu rozvoju predmetov. Ako je z obrázku 4 vidieť, z palety predmetov lesníckeho štúdia má 14 z nich priamu väzbu na modelovanie lesa, čo svedčí o všetrannosti odborníkov alebo ich tímov zaoberajúcich sa konštrukciou modelov. Aj obsah tejto knihy je dôkazom pestrosti problematiky, tak napríklad v kapitole 1 sa dotkneme problematiky ekológie lesa, pestovania lesa a fyziológie rastlín, v kapitole 2 sa zaoberáme kybernetikou, v kapitole 3 biometriou a dendrometriou, v kapitole 4 náukou o produkcii lesa a v kapitole 10 informatikou, diaľkovým prieskumom Zeme a geografickými informačnými systémami. To všetko samozrejme v kontexte analýzy a modelovania lesných ekosystémov. Aj ďalšie 4 predmety: ochrana lesa, ekonómia lesníctva, ťažbovo-dopravné technológie a hospodárska úprava lesov sú úzko späté s modelovaním a stretneme sa s nimi nepriamo v kapitole 6, minimálne na úrovni terminológie modelov a ich aplikácie.





1 Ekosystémové a ekofyziologické základy modelovania lesa

„Keby som mal k dispozícii hodinu času na to, aby som si poradil s problémom, od ktorého by závisel môj život, strávil by som 40 minút jeho štúdiom, 15 minút skúmaním informácií o ňom a 5 minút by som ho riešil“.

A. Einstein

Prečo musíme les dôkladne poznať, aby sme sa mohli zaoberať jeho modelovaním?

Kto sa často prechádza po lese, zaiste si všimne jeho rozmanitosť. Dominujú mu stromy, ktoré spolunažívajú s ďalšími rastlinnými organizmami (bylinami, machmi, lišajníkmi, hubami) a tvoria útočisko pre zver, prípadne sú ich potravou. Na prvý pohľad sa nám zdá, že je les veľmi jednoduchý, pretože máme pocit, že rastie sám, že tu bol dávno pred nami a že nás prežije. V skutočnosti je to veľmi zložitý systém, pretože všetky jeho súčasti sa vzájomne ovplyvňujú a formujú ho do podoby, ktorá je nám dôverne známa. Veci, ktoré sa nám zdajú samozrejme, však nemusia byť vecami jednoduchými. Napríklad veci zostrojené človekom ako je obyčajný papier a pero. Zdajú sa nám veľmi samozrejmy a jednoduchými dovtedy, pokiaľ si ich môžeme kúpiť v obchode. Predstavme si, že sa dostaneme niekde mimo civilizácie a budeme si chcieť písomne zaznamenať svoje myšlienky. Zistíme, že nemáme pero a ani papier. Rýchlo zbadáme, že nemáme za ne náhradu a nevieme si ju ani zaobstarať. Zrazu si uvedomíme, že papier a pero sa nám síce zdajú veľmi jednoduché, ale na ich výrobu treba ovládať určité fyzikálne a chemické procesy, na ktoré musíme vytvoriť aj vhodné podmienky. Ak nevieme detaily o veciach, ktoré boli zostrojené človekom, ešte komplikovanejšie to bude s lesom. Za to, že stromy rastú, vďačíme **fotosyntéze**. Procesu, ktorý z oxidu uhličitého, vody a slneč-

ného žiarenia za existencie vhodných podmienok, tvorí organické zložky a kyslík. Ak by to bol proces jednoduchý, dokázali by sme oxid uhličitý premeniť na kyslík bez produkovania vedľajších škodlivých látok a hneď by sme vyriešili skleníkový problém zahrievania atmosféry. Problém, ktorý sa podobá na „kameň mudrcov“, a ktorého vyriešenie je hodné Nobelovej ceny. Pri tvorbe akýchkoľvek modelov, či už technických alebo biologických, musíme originálne systémy dôkladne poznať. Aby sme zostrojili funkčný model lietadla na diaľkové ovládanie, musíme poznať základné princípy letu lietadiel a ich manévrovania v priestore. Ak chceme zostrojiť funkčný model lesa vo forme počítačového programu, musíme vedieť veľa o jeho zložkách a reakciách na rozmanité podmienky okolitého prostredia. Bez týchto vedomostí je naše úsilie vopred stratené.

Čo sa dozvieme v tejto kapitole?

Vedci, ktorí sa zaoberajú modelovaním lesa, musia poznať lesný ekosystém, jeho zložky a procesy v ňom prebiehajúce. Zároveň musia získať ďalšie údaje, napríklad vo forme výsledkov rôznych pokusov, ktoré musia štatisticky spracovať a vyhodnotiť. Až potom nasleduje samotná tvorba modelu. Podľa „receptu“ EINSTEINA, je preto vhodné dve tretiny času tráviť štúdiom problému, jednu štvrtinu času venovať zberu a spracovaniu terénnych experimentálnych údajov a až zvyšok času obetovať konštrukcii modelu.

Register

A

Absorpcia slnečného žiarenia 419
 Agregáčny index Clarka a Evansa 270
 Akropetálne šírenie 385
 Akrotónny rast 396
 Albedo 418, 433
 Alokácia 62, 443
 Alometria 164, 170
 Alometrická rovnica biomasy 357
 Anabolizmus a katabolizmus 161
 Analytické krivky a plochy 469
 Analýza kovariancie 125
 Analýza senzitivnosti 148
 Analýza systémov 91
 Analýza variancie 123
 Analýzy vývrtov 79
 Anamorfná interpolácia 352
 Apikálny meristém 53
 Aproximačné krivky a plochy 473
 Architektonický model 395
 Architektúra stromu 395
 Arrheniusova rovnica 443
 Arten-profil index podľa Pretzscha 284
 Asimilácia 431
 Asimilácia a disimilácia 162
 Assmannova teória 182
 Atraktor 327
 Automaty voxlovho priestoru 401

B

Bayesova kalibrácia modelu 150
 Bazipetálne šírenie 385
 Bazitónny rast 396
 Bilbordové modely 496
 Biogeografické regióny 31
 Biogeochemický cyklus 430
 Biochemický cyklus 431
 Bióm 29
 Biomasa 116, 250, 357, 445, 457
 Biometrické charakteristiky koruny 243, 248
 Biómové modely 199, 202
 Biosféra 29
 Biosociologické postavenie stromu 329
 Biotop 29
 Bod vädnutia 429
 Bonita porastu 179, 180
 Bonita stanovišta 177
 Bowenov pomer 434

C

Campbellov elipsoid 422
 Celková objemová produkcia 117, 119
 Celkový bežný prírastok 118
 Celkový priemerný prírastok 118

Cenóza 33
 Cieľová frekvenčná krivka 337
 Clearinghouse 537
 Cloudové počítanie 551
 Clusterové počítanie 550
 Cylindrická projekcia 482
 Cylindrické súradnice 467

Č

Časové rady 78

D

Dátový sklad 534
 Da Vinciho postulát 403
 Deliace pletivá 53
 Deterministický model 135
 Dialkový prieskum Zeme 522
 Diferenciácia hrúbok a výšok podľa Fuldnera 282
 Difúzne žiarenie 48, 417
 Disimilácia 162, 442
 Diskriminačná analýza 126
 Distribúcia uhlov listov (LAD) 422
 Distribučná funkcia 110
 Dizajnéry stromov 504, 506
 Dotykové sondy 393
 Downscale 199
 Druh 33
 Druhovú modely 220
 Dvojfázový Ritchieho model 427
 Dynamika hrúbkovej štruktúry 257

E

Efektivita 452
 Ekofyziologické modely 198, 223, 225
 Ekofyziologické modely „big leaf“ 223
 Ekofyziologické modely priemerného stromu 225
 Ekologická bonita 177
 Ekologická nika 29
 Ekosystém 29
 Empirické modely 193
 Empirické smerové pole 347
 Empirický model fotosyntézy 438
 Energetická bilancia listu 432
 Entropia podľa Shannona 283
 Evaluácia modelu 148
 Evaporácia 43, 427
 Existenčné skóre stromu 331
 Exogénne premenné 98, 192, 354, 404, 453
 Explicitný tvar krivky 470

F

Faktor expanzie biomasy (BEF) 357, 445, 457
 Faktorová analýza 131
 Fenológia 449
 Fenologická krivka 450
 Fenologické fázy 450
 Fibonacciho uhol 386
 Fotografické modely 498
 Fotorespirácia 442

Fotosynteticky aktívne žiarenie 48
 Fotosyntéza 57, 436
 Fraktál 370
 Frekvenčná funkcia 110
 Frekvenčné „gap“ modely 218
 Frekvenčné hrúbkové funkcie 253

- Beta funkcia 254
- Gamma funkcia 254
- Chalierová A-funkcia 254
- Liocurtova funkcia 256
- Meyerova funkcia 256
- Weibullova funkcia 255

 Frekvenčné „patch“ modely 218
 Frekvenčné populačné modely 219
 Funkcia dopytu a ponuky 439
 Funkcia odberu 258, 338
 Fuzzy funkcia 324
 Fuzzy pravidlá 172, 174, 324
 Fylogénéza 84
 Fylotaxia 385
 Fytotróny 82, 436

G

Generátory počasia 454
 Generátory štruktúry porastu 289, 356
 Generovanie priestorovej štruktúry 288
 Geografický informačný systém 511, 513, 538
 Geochemický cyklus 430
 Geometrické modely 494
 Geometrické prebievky 340
 Geoštatistika 542
 Globálne žiarenie 48, 417
 Graftál 370

H

Hemisférická projekcia 278, 305, 419
 Heteroskedasticita 145
 Hlavný porast 116
 Holorubný les 38
 Homomorfné systémy 101
 Homoskedasticita 145
 Horizont 49, 415
 Horizontálna projekcia plochy 466
 Hospodársky les 37
 Hraničná vzdialenosť 336
 Hrúbka stromu 115
 Hrúbková štruktúra porastu 251
 Hrubý (silný) klient 545
 Hustota porastu 167, 276
 Hydrologická bilancia 424
 Hyperspektrálne snímkovanie 524
 Hypotéza 94

Ch

Chovanie systému 69

I

Implicitný tvar krivky 469
 Index disperzie podľa Moristu 273

Index hustoty porastu podľa Reinekeho (SDI) 281
 Index listovej plochy (LAI) 420, 456
 Index premiešania podľa Földnera 287
 Index rozmiestnenia podľa Pielou 272
 Interaktívne prebievky 340, 487
 Intercepcia 43, 425
 Intermediárne premenné 98, 355, 405, 455
 Interpoláčnne krivky a plochy 473
 Izomorfné systémy 101

J

Jarvisov model 435
 Jedinec 33

K

Kahnova funkcia 174
 Kalibrácia modelu 148, 149, 150
 Karteziánske súradnice 466
 K-funkcia podľa Ripleya 273
 Klimaxové spoločenstvo 35
 Kmeň 53, 232
 Kmeňové analýzy 79, 232, 347
 Kmeňový profil 235
 Kohorta 197, 218
 Kochovej vložka 371
 Kolobeh dusíka 46
 Kolobeh uhlíka 45
 Kolobeh vody 42
 Kompenzačný bod 439
 Konkurencia 292, 452
 Konkurenčné indexy a metódy 294

- Alemdagova suma kruhových segmentov 296
- Difúzny stanovištný faktor z hemisférickej projekcie 305
- Hegyiho konkurenčný index 295
- Korunový konkurenčný faktor 298
- Korunové konkurenčné svetlo podľa Pretzsch 299
- Metóda horizontálneho rezu 296
- Pomer rozmerov stromov podľa Martina a Eka 296
- Pomer veľkosti korún stromov podľa Biginga a Dobbertina 298
- Prienik korún podľa Bella 294
- Rasterizácia porastovej plochy 300
- Polygóny rastovej plochy 301
- Výpočet priestorových vzdialeností 305

 Konvekčná výmena tepla 433
 Korekcia okrajových efektov 307
 Koreň 53, 357
 Korytnačia grafika 369
 Kritická kruhová základňa 182
 Kritické zakmenenie 277
 Kruhová základňa 115, 118, 119, 181, 278, 316
 Krycie pletivá 53
 Kubická projekcia 482, 493

L

Lambert-Beerov zákon 420
 Laterálny meristém 53

Lattice 279, 474
 Les vekových tried 37
 Letecké laserové skenovanie 525
 L-funkcia podľa Besaga 275
 Liebigov zákon minima 177, 440
 Linkeho koeficient 416
 List 55, 387, 390, 422, 432
 Listové pórometre 434
 Logit-model odumretia stromu 313
 L-systémy (Lindenmayerove systémy) 367
 Bezkontextové deterministické 375
 Kontextovo-senzitívne 383
 Parametrické 381
 Stochastické 380
 Zátvorkové 377

M

Makroelementy 42
 Maliarov algoritmus 481
 Markorelačná funkcia podľa Stoyanových 285
 Matica štruktúry 96
 Matica väzby 95
 Metóda exponenciálnej bázy 443
 Metóda Monte Carlo 137, 150, 321, 323
 Metódy modelovania konkurencie stromov 294
 Metódy stanovenia konkurentov 292
 Metóda pevného polomeru 292
 Metóda prieniku korún 293
 Metóda svetelného kužela 294
 Metóda uhlového počítania 293
 Meztónny rast 396
 Mikroelementy 42
 Mitscherlichov zákon 173
 Model 91, 98, 101, 135, 141, 143, 147, 190, 193, 197, 200, 343, 349, 351, 423, 435, 436, 438, 440, 444–448, 493–502, 527, 529
 Model alokácie 444–448
 Alometrický model 444
 Empirický model 444
 Model metabolickej nádrže 446
 Model rezistencie transportu 446
 Model mechanických obmedzení 447
 Pipe-model 448
 Teleonomický model 445
 Model BALANCE 206
 Model Biome-BGC 224
 Model BIOSOC 329
 Model BWIN 214,
 Model FOREST 210,
 Model FORET 217
 Model FORMIX 222
 Model fotosyntézy podľa Farquhara a von Caemmerer 440
 Model Holdridge 203
 Model hraničného konkurenčného tlaku stromov 315
 Model hraničnej hustoty porastu 316
 Model chovania lesa 98
 Model JABOWA 217
 Model LANDIS 219
 Model LIGNUM 208

Model Michaelis-Mentenovej kinetiky 438
 Model MOSES 210
 Modelovanie horizontu 415
 Modelovanie konkurencie stromov 292
 Modelovanie makroštruktúry porastu 289
 Modelovanie mikroštruktúry porastu 290
 Model podľa Balla a Berryho 436
 Model PROGNAUS 213
 Model ray tracing 423, 496
 Model redukcie rastového potenciálu 351
 Model SIBYLA 211
 Model SILVA 211
 Model STAOET 221
 Model štruktúry lesa 101
 Model TREEDYN3 225
 Modely dynamiky „gap“ skupín 222
 Modely dynamiky „path“ skupín 222
 Modely funkčných typov 221
 Modely krajiny 502
 Modely plochy 501
 Modely porastu 502
 Monopodiálny rast 396
 Monotónny rast 396
 Morfém 370
 Morfologická krivka kmeňa 235, 236–238
 Morfologická krivka koruny 243, 246
 Mortalita 311, 313, 317, 449
 Mortaltná diskriminačná funkcia 315
 Motýli efekt 328
 Mračno bodov 520
 Multiplikačný model rastu 349
 Multiplikátor rastu 159, 349, 350
 Münchova teória 443

N

Nulový (ultratenký) klient 546
 NWP modely 454

O

Objektový funkčný model 529
 Objem koruny 243, 250
 Objemové rovnice 241, 242
 Obnovné prvky 38, 40, 41, 342
 Occamova britva 94
 Odrazené žiarenie 48, 418
 „Off-the-shelf“ systémy 436
 Ohrozenie 318
 Omega faktor 435
 Ontogenáza 84
 Optimálna kruhová základňa 182
 Optimálne zakmenenie 277
 Orlia grafika 369
 Osové (axiálne) stromy 377

P

Paralelné spracovanie 548
 Parametrický tvar krivky 470
 Parametrizácia modelu 148
 Párkorelačná funkcia podľa Stoyanových 276

- Pedotransférne funkcie 430
 Penman-Monteithova rovnica 426
 Percentil kruhovej základne 330
 Percento korunového zápoja 278, 281
 Pipe-model 448
 Plná vodná kapacita 429
 Plocha korunových projekcií 251, 281, 465
 Počítačom podporované modelovanie lesa (CAFM) 511
 Počítačom podporovaný terénny zber údajov 513
 Pôdne hydrolimity 429, 430
 Podpora cieľových stromov 335
 Podpovrchový odtok 44, 428
 Podrastový les 39
 Podružný porast 116
 Poiseuille-Hagenov zákon 443
 Poissonov les 268
 Polárne súradnice 466
 Poľná kapacita 429
 Poľné pokusy 82, 124
 Polomer uvoľnenia 336
 Polymorfna interpolácia 352
 Populácia 33
 Populačné modely 220
 Porastové modely 194, 198
 Povrch koruny 243, 250
 Povrchový odtok 44, 428
 Pozemné laserové skenovanie 518
 Pravidlo 94
 Prebierková čiara 339
 Prebierkové indexy 339
 Prebierkové skóre stromu 331
 Prenosová funkcia systému 70, 261
 Presnosť modelu 141
 Presslerove pravidlo 445, 448
 Priame žiarenie 48, 417
 Priečne vzťahy 344
 Priemer koruny 115, 243, 249
 Pripustnosť atmosféry 416
 Priestorová štruktúra porastu 83
 Primárna produkcia 458
 Hrubá 458
 Čistá 458
 Prírastková funkcia 156
 Prírodný les 36
 Prírodná mortalita 311, 313
 Prírodné kubické splajny 235
 Prírodné zakmenenie 277
 Problém „čiernej skrinky“ 91
 Procesné modely 193, 195
 Profil koruny 242
 Programovanie modelov lesa 543
 Projekcia koruny 242
 Projekčná metóda „rybieho oka“ 480
 Proporcionálny model fotosyntézy 438
 Pruhová metóda 346
- R**
- Rastliny typu C3 60
 Rastliny typu C4 60
 Rastliny typu CAM 60
 Rastová efektivita 443
 Rastová funkcia 156, 162
 Rastová gramatika 370
 Rastová konštelácia 465
 Rastová plocha 301, 465
 Rastové dýchanie 442
 Rastové rady 78
 Rastové tabuľky 18, 194, 220, 346
 Rastovo závislá mortalita 312
 Rastový priestor 465
 Reakčný čas systému 71
 Redukovaná plocha 277
 Regresná analýza 120
 Regresný model rastu 343
 Regulácia systému 74
 Reinekeho pravidlo 168, 281, 316, 452
 Relačný dátový model 527
 Relatívna rýchlosť rastu 158
 Relatívny prírastok 158
 Relatívny rozptyl podľa Claphama 272
 Reprodukcia variability 135
 Respirácia 58, 442
 Riadenie systému 74
 Riadiace vzťahy 344
 Riadiaci parameter 87
 Riziko 318
 Rotačné plochy 471
 Rovnobežné premietanie 477
 Ručné laserové skenovanie 393
- S**
- Samodiferenciácia 452
 Sebapodobnosť 371
 Segregačný index podľa Pielou 287
 Senescencia 452
 Sférická projekcia 482
 Sférické súradnice 467
 Sférický denziometer 278
 Sierpiňského trojuholník 371
 Signál 87
 Simulácia 190
 Simulátor 147, 190
 Skleníkový efekt 50
 Slniečna deklinácia 49, 415
 Slniečna inklinácia 49, 415
 Slniečna radiácia 47, 414
 Slniečna rektascencia 49, 415
 Slniečna trajektória 414
 Smerníková metóda 347
 Solárna konštanta 417
 Spoločenstvo 33, 198, 200
 Správnosť modelu 141
 Statické vegetačné modely 202
 Stavové premenné 98, 192, 355, 407, 431, 455
 Stefan-Boltzmannova konštantna 433
 Stereoskopia 483
 Stochastický model 135
 Stredná hrúbka 118, 252, 281
 Stredná výška 118, 178, 261
 Stredové premietanie 479



Stres 452
Stromové ekofyziologické modely 205
Stromové empirické modely nezávislé na pozíciách 213
Stromové empirické modely závislé na pozíciách 209
Stromové funkčno-štruktúrne modely 207
Stromové „gap“ modely 216
Stromové modely 194
Stromové „patch“ modely 216
Stupeň pomoci 336
Stupeň produkčnej úrovne 181, 344
Sukcesia 35
Sukcesné modely 198, 216
Sukcesné štádium 35
Sukcesný rad 35
Superpočítanie 550
Symetrický a asymetrický tvar koruny 248
Sympodiálny rast 396
Syntéza systémov 91
Systém 69, 77–90, 91, 192
Systémové parametre 98, 148, 150, 191, 358, 407, 459
Systémový diagram 96, 102, 431
Systémy výmeny plynov 436

Š

Šachovnica modelov 201
Špecifická listová plocha (SLA) 456
Štruktúrne modely 193, 195, 207
Štruktúra systému 69

T

Tabuľkové zakmenenie 277
Tenký (slabý) klient 545
Teória 94
Teória chaosu 326
Teória Pipe-model 448
Thomasiusova funkcia 174
Tmavá respirácia 442
Topológia orgánov stromu 395
Topologická a fraktálna dimenzia 371
Topologický model 395
Translokácia 62, 443
Transpirácia 43, 425, 433
Trenažéry lesa 554
Tropizmus 56, 399
Tvar kmeňa 232, 235
Tvarové kvocienty 235
Tvarové rady 235
Tvoriaca čiara 471

U

Udržiavacie dýchanie 442
Uhlová výška slnka 49, 415
Unimodálna funkcia dávky a účinku 172
Unimorfna interpolácia 352
Upscale 199

V

Validácia modelu 148
Vegetačné indexy 526
Vegetačné stupne 31
Vektor tropizmu 399
Vertikálny profil porastu 466
Virtuálna guľa 554
Virtuálna jaskyňa 554
Virtuálna realita 486
Virtuálny les 492, 554
Vitalita 452
Vlhkosť pôdy 429
Vnútoraná mortalita 311
Vodivé pletivá 53
Vodivosť prieduchov 434
Vodný potenciál 60, 429
VRML 487
Výberkový les 40, 88, 99, 256, 264, 265, 337
Vychýlenie modelu 141
Vystavenie 318
Výška nasadenia koruny 115, 243, 249
Výška stromu 115, 526
Výšková štruktúra porastu 261
Výškové krivky 262
 Jednotná výšková krivka 262, 265
 Štádiová výšková krivka 262
 Výšková tarifa rovnovekého lesa 263
 Výšková tarifa výberkového lesa 264
 Vývojová výšková krivka 263
Výtvarnica 115
Vytvárajúce sa plochy 387

Y

Yodovo pravidlo 169, 452

Z

Základné pletivá 53
Základné vzťahy 344
Zakmenenie 277
Zákon 94
Zákon exponenciálneho zužovania 447
Zákonitosť 94
Zápoj 278, 280, 281
Zdieľanie virtuálneho lesa 555
Združený porast 116
Zemepisný azimut slnka 49, 415
Zenitový uhol slnka 49, 415
Zhluková analýza 129
Zložené listy 390
Znalostný a expertný systém 531
Zraniteľnosť 318

Ž

Životnosť 452

