LESNICTVÍ-FORESTRY, *44*, 1998 (8): 333–343

MODELOVÁNÍ VÝVOJE ZDRAVOTNÍHO STAVU SMRKOVÝCH POROSTŮ KRKONOŠ S POUŽITÍM SATELITNÍCH SNÍMKŮ

THE NORWAY SPRUCE (*PICEA ABIES*) HEALTH STATE DEVELOPMENT MODELLING WITH SATELLITE DATA IN THE KRKONOŠE MTS.

K. Matějka[1], S. Vacek[2], O. Schwarz[3]

[1]*IDS, Plzeňská 86, 150 00 Praha 5*
[2]*Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, Výzkumná stanice, 517 73 Opočno*
[3]*Správa Krkonošského národního parku, Dobrovského 3, 543 11 Vrchlabí*

ABSTRACT: Ten permanent study plots were selected in the area of the Krkonoše Mountains in Norway spruce stands. A comparison of the results on terrestrially assessed health state (on the basis of defoliation) of the stands and processed LANDSAT TM satellite records of remote sensing was carried out. Both the series of defoliation assessments and the surrounding within rasters of the forest condition indices (based on satellite imagery) are available by each selected plot. Defoliation was evaluated for all living trees of the plot using six defoliation classes. Relationship between defoliation and forest condition index was described on the basis of a regression model. There are some relations of selected parameters – its properties change from year to year.

Norway spruce stands; health state; defoliation; remote sensing; LANDSAT TM; mathematical modelling; transition matrix

ABSTRAKT: Pro porovnání terénního šetření zdravotního stavu smrkových porostů a vyhodnocení stavu lesa ze satelitních snímků LANDSAT TM v Krkonoších bylo vybráno deset trvalých výzkumných ploch. Jedná se o plochy, pro které jsou k dispozici údaje o defoliaci smrku z pozemního šetření a současně je jejich okolí obsaženo ve vyhodnocení indexu kondice lesa ze satelitního snímkování. Defoliace jednotlivých stromů na plochách byla vyjádřena v šesti třídách defoliace. Vztah mezi defoliací stromů a indexem kondice lesa byl vyjádřen regresním modelem. Z výsledků vyplývá, že existuje vztah mezi defoliací a indexem kondice lesa, který však není jednoznačný a rok od roku se mění.

smrkové porosty; zdravotní stav; defoliace; dálkový průzkum Země; LANDSAT TM; matematické modelování; přechodové matice

ÚVOD

Krkonoše patří k typickému příkladu území centrální části střední Evropy postiženého velkoplošným globálním poškozením lesa (Tesař et al., 1982; Vacek, Lepš, 1987, 1996; Vacek, 1989; Vacek, Vašina, 1991; Vacek, 1995; Lokvenc et al., 1992; Chalupský, 1992). To je jedním z důvodů, že právě z tohoto území je k dispozici velký objem dat o vývoji stavu lesních porostů a dalších ekosystémů (Vacek, ed., 1996). Při sledování lesních ekosystémů nejde jen o sběr dat, ale také o jejich využití, což souvisí s uspořádáním a předzpracováním dat (viz příklad jednoho rozsáhlého projektu z území Německa – Bredemeier et al., 1995).

Příspěvek se snaží představit jeden možný pohled na zpracování dat o stavu lesů na území Krkonošského národního parku. Tato data již byla z určitých hledisek hodnocena, nebyla však zpracována komplexně tak, aby bylo možné porovnat různé datové zdroje. Jedná se především o porovnání terénního šetření defoliace lesních porostů a vyhodnocení satelitních snímků LANDSAT TM. Příspěvek ukazuje využití dlouhodobého terénního sledování poškození lesních porostů na trvalých výzkumných plochách (TVP) pro ověření možností modelování vývoje zdravotního stavu porostů pomocí retrospektivního vyhodnocení satelitních snímků. Úkol vyplynul z nutnosti omezit maximální měrou nahodilé těžby v Krkonoších a zároveň co nejdéle zachovat zejména lesní porosty uznané ke sběru osiva, které jsou často

silně poškozené v důsledku působení faktorů znečištění ovzduší. Úkol byl realizován v rámci výzkumného projektu GA/78/93 *Rekonstrukce lesních ekosystémů KRNAP* Programu péče o životní prostředí. Pozornost byla omezena na porosty smrku [*Picea abies* (L.) KARST.].

ROZBOR PROBLEMATIKY

Využití dálkového průzkumu Země pro účely detekce poškození lesů bývá v současnosti často používáno a příslušné metodiky jsou průběžně rozvíjeny (Schanda, 1976; Winkler, 1993; UNEP, 1995; Singh, 1995; Parlow, 1996).

Využití GIS pro účely obhospodařování lesů v Krkonoších rozebírají Schwarz (1995) nebo Emmer (1996). Metodika modelování poškození lesa byla vyvíjena od začátku sledování tohoto jevu v lesích (např. Bossel et al., 1985), často se tato problematika řešila rozšířením již připravených modelů vývoje lesa o složku popisující vlivy související s poškozováním lesa. Řešení problematiky modelování poškození lesa rovněž vede k začlenění tohoto procesu do systému globálních změn (Steffen et al., 1996). Může se stát i základem pro precizní definici některých pojmů souvisejících s poškozováním lesa (Slovik, 1996a,b). Cílené užití modelování zdravotního stavu porostů pro lesní hospodářství popisují např. Saarenmaa et al. (1994).

Příklad aplikace modelů vývoje stavu lesa na území Krkonoš představuje např. Vacek (1990). V návaznosti na charakter použitých dat o zdravotním stavu lesa (defoliace jednotlivých stromů hodnocená odhadem v terénu) bylo zvoleno modelování pomocí maticových lineárních modelů, které má již značnou tradici v ekologii. To bylo použito již dříve pro sledování dynamiky poškozovaného lesa – např. v podobě přechodových matic (Vacek, 1987) nebo Leslieho matic (Vacek, Lepš, 1991). V následujícím textu použitý model využívající pravděpodobností přechodu stromu vždy mezi dvěma třídami poškození je rámcově metodicky shodný s první prací a je také určitou paralelou práce druhé. V obou uvedených případech se jedná o pravděpodobnostní modely založené na tzv. Markovových řetězcích (např. Mandl, 1985).

METODIKA

Základní vyhodnocení probíhalo na základě porovnání výsledků pozemního sledování stavu stromů v porostech *Picea abies* na vybraných výzkumných plochách a zpracovaných dat družicového snímkování (užita data LANDSAT TM). Na základě dat DPZ – scén z let 1984, 1986, 1990, 1992 a 1995 byly vypočteny tzv. indexy kondice lesa.

VÝZKUMNÉ PLOCHY A TERÉNNÍ HODNOCENÍ DEFOLIACE

Pro hodnocení bylo vybráno deset trvalých výzkumných ploch, pro které jsou k dispozici údaje o defoliaci smrku (pozemní šetření) a současně je jejich okolí obsaženo ve vyhodnocení indexu kondice lesa ze satelitního snímkování. Defoliace jednotlivých stromů byla odhadována na celé desítky procent a posléze zařazena do šesti stupňů defoliace:

0 0–9 %
1 10–29 %
2 30–49 %
3 50–69 %
4 70–99 %
5 100 % (odumřelý strom).

I. Základní charakteristiky defoliace (průměrné údaje v procentech pro všechny stromy na ploše; hodnoty jsou průměry či intervaly pro období 1987–1995) a vývoje defoliace smrku na sledovaných studijních plochách – Basic parameters of the tree defoliation (average values in per cent as mean over all living trees of the plot; values represent averages or intervals in the period 1987–1995) and the defoliation development

Plocha[1]	Defoliace[2]		Minimální defoliace[3]		Směrodatná odchylka[4] (s_{DEFOL})	Vývoj defoliace v období 1987–1995[5]	
	(**DEFOL**)	interval[6]	(min_{DEFOL})	interval[6]		korelační koeficient[7] (**r**)	změna defoliace za rok[8]
TVP 10	36,4	27,3–47,4	29,1	21,6–40,6	14,6	–0,858	–1,859
TVP 11	42,5	38,1–51,1	34,0	30,3–42,4	16,9	–0,622	–0,865
TVP 12	40,2	33,4–48,4	32,0	23,9–40,1	16,6	–0,566	–0,875
TVP 18	40,3	29,4–45,5	32,1	19,8–39,1	16,3	–0,433	–0,783
TVP 19	34,0	24,5–43,8	26,9	19,3–35,8	14,1	–0,782	–1,682
TVP 20	37,3	28,0–45,8	29,7	19,5–37,5	15,2	–0,778	–1,430
TVP 21	30,8	24,0–39,7	24,3	19,7–33,3	13,0	–0,689	–1,231
TVP 23	40,8	32,9–51,8	32,0	23,8–42,4	17,6	–0,839	–1,779
TVP 24	29,3	23,0–36,5	22,2	16,5–29,3	14,1	–0,857	–1,143
TVP 25	32,3	23,9–42,6	25,5	17,9–35,7	13,6	–0,785	–1,684

[1]plot, [2]defoliation, [3]minimal defoliation, [4]standard deviation of defoliation, [5]defoliation development in 1987–1995, [6]interval, [7]correlation coefficient, [8]change of defoliation per year

Rozbor problémů souvisejících s používáním defoliace pro charakteristiku poškození stromu a lesního porostu byl podán na jiných místech více autory (např. Matějka, 1993), prakticky shodná metodika je použita rovněž v mezinárodním projektu ICP-Forests (Lorenz, 1995). Popis vybraných výzkumných ploch uvádí Vacek (1996).

INDEX KONDICE LESA

Index kondice lesa je zpracován na základě kombinace jednotlivých spektrálních kanálů snímků LANDSAT TM tak, aby jeho hodnota vypovídala o vitalitě lesního porostu v daném místě. Nižší hodnoty mají odpovídat lepší kondici lesa, což by mělo platit pouze pro srovnání jednoho konkrétního roku, srovnání mezi lety nelze přímo použít. Metodiku výpočtu navrhl a provedl M. Šíma (ORBITEC CONSULTING, České Budějovice; podrobnosti Šíma, 1994). Původní hodnoty indexu kondice lesa pro finální masku lesa byly vypočítány jako reálné hodnoty. Nejvyšší hodnota indexu (1,64) byla zjištěna ve scéně 950710. Přepočet reálných hodnot na celočíselné (1 až 255) byl proveden na základě vynásobení reálných hodnot konstantou 150 a zaokrouhlením na celé číslo. Tyto výpočty byly provedeny v prostředí systému pro digitální zpracování obrazu SunSparc IPX & EASI/PACE s následným exportem rastrů do formátu TIFF (provedla firma ORBITEC CONSULTING). Data kondice lesa byla vyhodnocena ve formě šedotónových rastrů s hodnotami ve škále 1 až 255.

VZTAH MODELU TERESTRICKÉHO HODNOCENÍ DEFOLIACE A MODELU INDEXŮ KONDICE LESA

Model terestrického hodnocení defoliace je indexem vyjadřujícím stav konkrétního porostu na základě hodnocení defoliace jednotlivých stromů v porostu:

$$\mathbf{M_t} = \text{D_AVG}\ \mathbf{DEFOL} + \text{D_STD}\ s_{DEFOL} \quad \text{(model průměru)}$$

nebo

$$\mathbf{M_t} = \sum_{i=0}^{5} \text{FREQ}_i\ (\mathbf{F_i})^{e[i]} \quad \text{(model frekvenční)},$$

kde: **DEFOL** je průměrná defoliace (aritmetický průměr) všech stromů na ploše (v procentech), s_{DEFOL} je směrodatná odchylka defoliace všech stromů na ploše (v procentech) a $\mathbf{F_i}$ je relativní frekvence počtu stromů v třídě defoliace i. D_AVG, D_STD, resp. FREQ_i jsou volené konstanty (doporučena je jejich volba v rozmezí −1,0 až +1,0). Na základě modelu $\mathbf{M_t}$ = **DEFOL** −0,5 s_{DEFOL} je vyjádřena takzvaná minimální defoliace (průměrná defoliace nejméně poškozených stromů v porostu, označovaná v následujícím $\mathbf{min}_{DEFOL}$; viz Matějka, 1994).

Pro každou sledovanou plochu (TVP) byly vytvořeny matice 11 x 11 pixelů, obsahující hodnoty indexu kondice lesa ve středu příslušné studijní plochy a v jeho okolí. Střed plochy je vždy ve středu matice. Velikost pixelu je 25 x 25 metrů. Směr řádku, resp. sloupce matice je totožný se směrem východ–západ, resp. sever–jih v Gauss-Krügerově zobrazení. Pokud se v dalším mluví o velikosti okolí centrálního pixelu, pak je uvažována šíře pásu (vyjádřená počtem pixelů) tvořícího okolí centrálního pixelu: okolí velikosti 0 odpovídá vlastnímu centrálnímu pixelu, okolí velikosti 1 je představováno maticí dimenze 3 x 3 a okolí velikosti 5 pak celou maticí dimenze 11 x 11.

Model indexů kondice lesa je indexem snažícím se podat odhad poškození lesního porostu v určitém hodnoceném okolí středu studijní plochy na základě zpracování obrazu pořízeného skenerem LANDSAT TM:

$$\mathbf{M_k} = \text{RS_AVG}\ \mathbf{rs} + \text{RS_STD}\ s_{rs}$$

kde: rs je aritmetický průměr hodnot indexů kondice lesa v uvažovaném okolí středu studijní plochy a s_{rs} je směrodatná odchylka hodnot indexů kondice lesa v uvažovaném okolí středu studijní plochy. RS_AVG a RS_STD jsou volené konstanty (opět volené z intervalu −1,0 až +1,0).

Vztah mezi defoliací stromů hodnocenou terestrickým pozorováním a výpovědní hodnotou modelu indexu kondice lesa byl vyjádřen regresním modelem

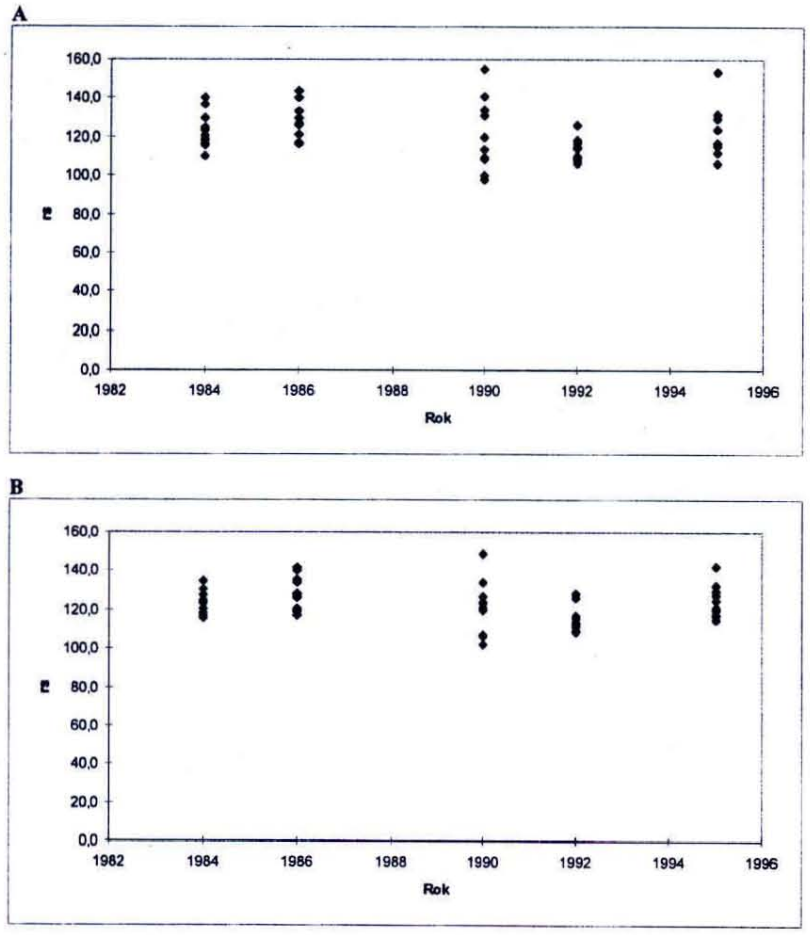
$$\mathbf{M_k} = a + b\ \mathbf{M_t},$$

který byl posuzován na základě výpočtu indexu lineární korelace (r). Modelování bylo provedeno pomocí nově sestaveného programu KRKPRO.

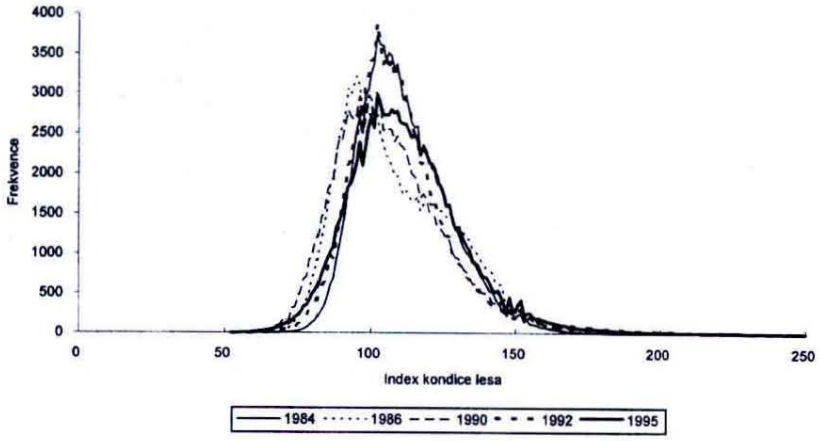
PROGNÓZA VÝVOJE LESA

Pokus o předpověď dalšího vývoje lesa byl proveden na základě zařazení jednotlivých stromů do tříd defoliace a změny tohoto zařazení v průběhu sledování. Pro dva po sobě následující roky tak bylo možné sestavit pro každou sledovanou plochu přechodovou matici, ze které vyplývá, jak se změnilo zařazení hodnocených stromů. Probíhá-li v po sobě následujících letech vývoj vyjadřující obdobný trend a příliš se nemění podmínky prostředí, lze předpokládat, že přechodové matice budou mít obdobnou strukturu i v následující blízké budoucnosti. Proto byla rozlišena relativně homogenní období vývoje stavu lesa a byly vypočítány „průměrné přechodové matice" jako matice, jejíž prvky jsou aritmetickým průměrem příslušných prvků originálních matic. Lze předpokládat, že na základě těchto matic lze dále počítat pravděpodobný vývoj porostu v dalším období.

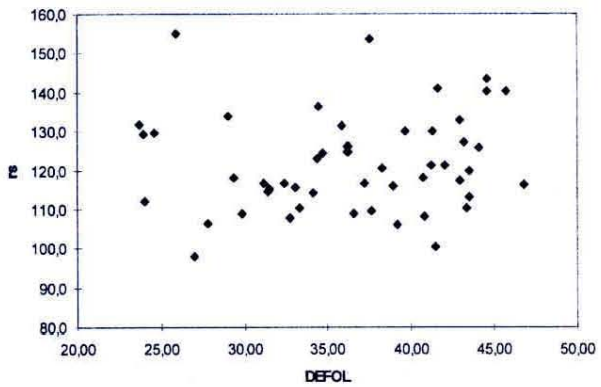
Předchozí postup umožní odhad vývoje v konkrétním porostu, nelze jej však použít k celoplošnému odhadu v území Krkonošského národního parku – nelze na jeho základě předpovědět rozložení lokalit, kde můžeme v budoucnu očekávat nejvýraznější zhoršování zdravotního stavu lesa. Je možné předpokládat, že odhad těchto „problematických" míst lze provést na základě změny indexu kondice lesa mezi dvěma lety v posledním období sledování. Toto porovnání bylo vyhodnoceno na základě barevné syntézy dvou rastrových obrazů s pixely v úrovních šedi odpovídajících indexu kondice lesa.



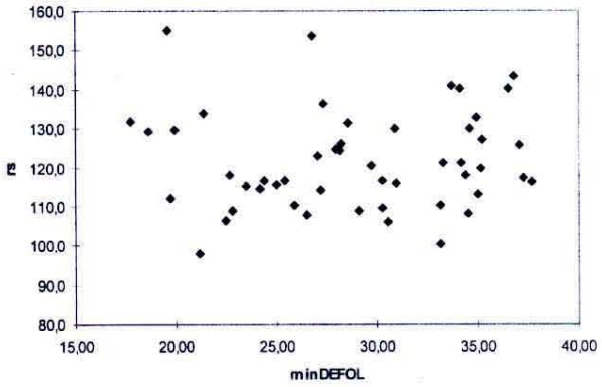
1. Průměry indexu kondice lesa (**rs**) okolí středu studijní plochy definovaného jedním (A), resp. pěti (B) pixely v závislosti na roku snímání – Averages of forest condition index (**rs**) with surrounding of the central pixel width of one (A) and five (B) pixels according to the year



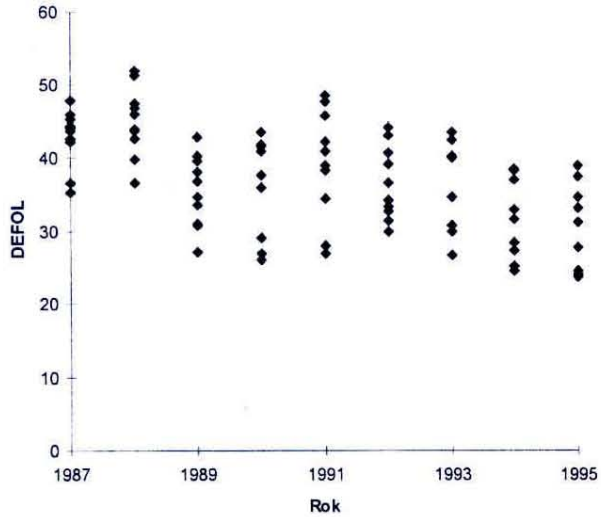
2. Frekvence pixelů podle indexu kondice lesa (**rs**) v jednotlivých letech sledování – Total frequencies of pixels according to the value of forest condition index (**rs**) according to the year



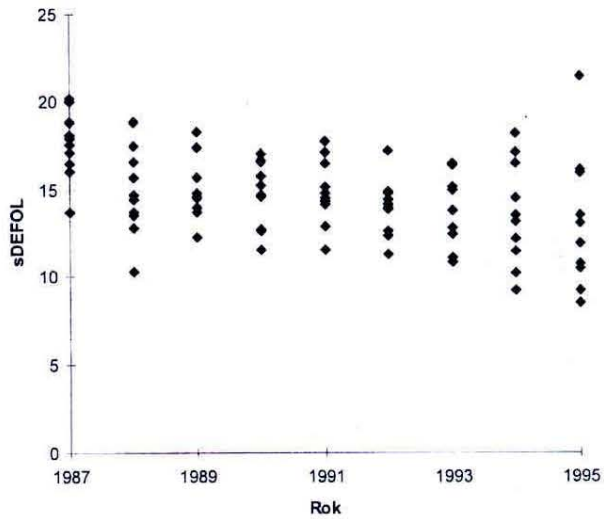
3. Rozdělení studijních ploch (uvažovány všechny roky sledování) v závislosti na průměrné defoliaci (**DEFOL**) a průměru indexu kondice lesa (**rs**) okolí středu studijní plochy, definovaného jedním pixelem. Šest nejvíce vzdálených bodů v levé horní části grafu odpovídá plochám TVP 24 a TVP 25 v roce 1990, resp. TVP 18, TVP 19, TVP 24 a TVP 25 v roce 1995 – Scattergram of the study plots (all years) according to the average defoliation (**DEFOL**) and average value of forest condition index (**rs**; bound of 1 pixel width). The most distant points in left upper part of the graph represent plots TVP 24, TVP 25 (in 1990) and TVP 18, TVP 19, TVP 24, TVP 25 (in 1995)



4. Rozdělení studijních ploch (uvažovány všechny roky sledování) v závislosti na průměrné minimální defoliaci ($\mathbf{min}_{DEFOL}$) a průměru indexu kondice lesa (**rs**) okolí středu studijní plochy, definovaného jedním pixelem. Šest nejvíce vzdálených bodů v levé horní části grafu odpovídá plochám TVP 24 a TVP 25 v roce 1990, resp. TVP 18, TVP 19, TVP 24 a TVP 25 v roce 1995 – Scattergram of the study plots (all years) according to the minimal defoliation ($\mathbf{min}_{DEFOL}$) and average value of forest condition index (**rs**; bound of 1 pixel width). The most distant points in left upper part of the graph represent plots TVP 24, TVP 25 (in 1990) and TVP 18, TVP 19, TVP 24, TVP 25 (in 1995)



5. Vývoj defoliace (**DEFOL**) v posledním období zlepšování stavu porostů (1987–1995) – Development of the average defoliation (**DEFOL**) during the last period of health state improving (1987–1995)



6. Vývoj směrodatné odchylky defoliace (s_{DEFOL}) v posledním období zlepšování stavu porostů (1987–1995) – Development of the standard deviation of defoliation (s_{DEFOL}) during the last period of health state improving (1987–1995)

VÝSLEDKY A DISKUSE

STAV POROSTŮ NA STUDIJNÍCH PLOCHÁCH

Pro každou výzkumnou plochu a každý rok byla vypočítána:

- průměrná defoliace (**DEFOL**) jako aritmetický průměr hodnot defoliace všech stromů v procentech (jako střed třídy podle klasifikace příslušného stromu; obr. 5);
- směrodatná odchylka defoliace (s_{DEFOL}) – ta je příslušnou statistikou statistického výběrového souboru jako v předchozím případě (obr. 6);
- odhad minimální defoliace ($\mathbf{min}_{DEFOL}$) jako hodnota **DEFOL** – (0,5 s_{DEFOL});
- frekvence počtu stromů v jednotlivých stupních defoliace (tab. II).

Popis procesů poškozování sledovaných porostů uvádí např. Vacek (1996), Vacek, Lepš (1996). Po zpracování dat bylo zjištěno, že na všech plochách probíhal vývoj defoliace obdobně. Do roku 1987 probíhalo zhoršování zdravotního stavu lesa (zvyšování defoliace). Od této doby dochází k pravidelnému zlepšování stavu těchto porostů – průměrná defoliace se ročně průměrně snížila o 1,5 %. Vzhledem k této skutečnosti nelze použít výsledků ze sledovaných výzkumných

II. Korelační koeficienty (**r**) pro hodnocení vztahu mezi pozemním šetřením defoliace stromů smrku a indexem kondice lesa počítaným ze satelitních snímků (průměr pro okolí centrálního pixelu plochy tvořené šíří jednoho pixelu) – Correlation coefficients (**r**) of the relation between parameters of terrestrial assessment of defoliation and index of forest condition based on satellite data (as average over 3 x 3 pixels, one of 25 m in size)

Hodnocení na základě frekvence jednotlivých stupňů defoliace ($\mathbf{F}_0$ je frekvence stromů ve třídě defoliace 0, atd.)[1]							
Model[2]		$\mathbf{F}_0 + \mathbf{F}_1$	$\mathbf{F}_0 + \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$	$\mathbf{F}_3 + \mathbf{F}_4 + \mathbf{F}_5$	$\mathbf{F}_4 + \mathbf{F}_5$	$\mathbf{F}_5$	$\mathbf{F}_0 + \mathbf{F}_1 - \mathbf{F}_4 - \mathbf{F}_5$
Rok[3]:	1984	–0,725	–0,714	0,714	0,693	0,748	–0,736
	1986	–0,673	–0,692	0,692	0,764	0,780	0,751
	1990	0,64	0,532	–0,532	–0,556	–0,565	0,623
	1995	–0,807	–0,743	0,742	0,792	0,782	–0,807
	1995	–0,106	–0,441	0,441	0,502	0,407	–0,335

Hodnocení na základě modelu průměru defoliace[4]					
Model[2]		**DEFOL**	s_{DEFOL}	min_{DEFOL}	Index vícenásobné korelace[5] (r^2)
Rok[3]:	1984	0,571	0,401	0,611	0,531
	1986	0,597	0,403	0,609	0,372
	1990	–0,568	–0,045	–0,596	0,455
	1992	0,801	–0,651	0,825	0,712
	1995	0,396	0,723	–0,143	0,738

[1]evaluation on the basis of defoliation frequency classes ($\mathbf{F}_0$ represents the tree frequency class 0, etc.), [2]model of defoliation, [3]year, [4]evaluation on the basis of defoliation averages, [5]multiple correlation index

ploch pro přímou predikci výskytu rizika zvyšování poškození porostů v následujících letech. Zde je nutné také upozornit na skutečnost, že relativní zlepšování stavu porostu je často následkem odumření nejvíce poškozených stromů, které nejsou při následujícím počítání průměrné defoliace brány v úvahu.

Pro hodnocení výsledků je rovněž důležité uvažovat zjištěnou závislost mezi průměrnou defoliací a směrodatnou odchylkou defoliace na ploše ($r = 0{,}562$ při počtu případů $n = 149$), které lze popsat regresními rovnicemi

$$s_{DEFOL} = 7{,}363 + 0{,}2156\ \mathbf{DEFOL}$$

$$\mathbf{DEFOL} = 14{,}149 + 1{,}4623\ s_{DEFOL}$$

MODELOVÁNÍ VÝVOJE LESA NA ZÁKLADĚ PŘECHODOVÝCH MATIC

Níže jsou uvedeny tři příklady vývoje hypotetického porostu s převahou stromů v první a druhé třídě defoliace. Počáteční průměrná defoliace byla 32,7 %. Přechodové matice byly konstruovány na základě všech deseti sledovaných ploch, rozdíly se týkaly období, v rámci kterých byly průměrné přechodové matice počítány. Limitním rokem pro stanovení období byl rok 1987, v němž se měnil charakter vývoje porostů. Model byl počítán pro období deseti let.

Je zřejmé, že při všech scénářích vývoje porostu se jeho stav zhoršuje, avšak s různou rychlostí. Model II

Model I. Všechny plochy, všechny roky sledování (1981–1995)

Průměrná přechodová matice:	Frekvence stromů ve třídách defoliace 0 až 5:	
0: 0,83 – 0,15 – 0,01 – 0,00 – 0,00 – 0,00	rok 0:	10 – 50 – 50 – 20 – 0 – 0
1: 0,00 – 0,72 – 0,26 – 0,00 – 0,00 – 0,00	rok 1:	8 – 46 – 54 – 15 – 4 – 2
2: 0,00 – 0,14 – 0,73 – 0,09 – 0,01 – 0,00	rok 2:	7 – 43 – 55 – 13 – 5 – 6
3: 0,00 – 0,01 – 0,20 – 0,51 – 0,18 – 0,08	rok 3:	6 – 41 – 55 – 13 – 6 – 10
4: 0,00 – 0,00 – 0,02 – 0,07 – 0,47 – 0,42	rok 4:	5 – 39 – 54 – 12 – 6 – 14
5: 0,00 – 0,00 – 0,00 – 0,00 – 0,00 – 0,99	rok 5:	4 – 38 – 53 – 12 – 6 – 18
	rok 6:	4 – 36 – 52 – 12 – 6 – 21
	rok 7:	3 – 35 – 50 – 11 – 5 – 25
	rok 8:	3 – 34 – 49 – 11 – 5 – 29
	rok 9:	2 – 32 – 47 – 11 – 5 – 32
	rok 10:	2 – 31 – 46 – 11 – 5 – 35

Model II. Všechny plochy, období do roku 1986

Průměrná přechodová matice:	Frekvence stromů ve třídách defoliace 0 až 5:	
0: 0,70 – 0,28 – 0,01 – 0,00 – 0,00 – 0,00	rok 0:	10 – 50 – 50 – 20 – 0 – 0
1: 0,00 – 0,77 – 0,21 – 0,00 – 0,00 – 0,00	rok 1:	7 – 44 – 54 – 18 – 5 – 2
2: 0,00 – 0,04 – 0,83 – 0,10 – 0,01 – 0,00	rok 2:	5 – 39 – 55 – 17 – 7 – 6
3: 0,00 – 0,00 – 0,05 – 0,62 – 0,22 – 0,09	rok 3:	4 – 34 – 55 – 17 – 9 – 12
4: 0,00 – 0,00 – 0,00 – 0,01 – 0,52 – 0,46	rok 4:	3 – 30 – 54 – 17 – 9 – 18
5: 0,00 – 0,00 – 0,00 – 0,00 – 0,00 – 0,99	rok 5:	2 – 26 – 52 – 17 – 9 – 23
	rok 6:	1 – 23 – 50 – 16 – 9 – 29
	rok 7:	1 – 21 – 48 – 16 – 9 – 35
	rok 8:	1 – 19 – 45 – 15 – 9 – 41
	rok 9:	1 – 17 – 42 – 15 – 9 – 47
	rok 10:	0 – 15 – 40 – 14 – 9 – 52

Model III. Všechny plochy, období 1987–1995

Průměrná přechodová matice:	Frekvence stromů ve třídách defoliace 0 až 5:	
0: 0,94 – 0,03 – 0,01 – 0,00 – 0,00 – 0,00	rok 0:	10 – 50 – 50 – 20 – 0 – 0
1: 0,00 – 0,68 – 0,30 – 0,00 – 0,00 – 0,00	rok 1:	10 – 47 – 55 – 13 – 4 – 2
2: 0,00 – 0,24 – 0,65 – 0,07 – 0,00 – 0,01	rok 2:	9 – 46 – 55 – 10 – 4 – 5
3: 0,00 – 0,02 – 0,33 – 0,41 – 0,15 – 0,07	rok 3:	9 – 46 – 54 – 9 – 4 – 9
4: 0,00 – 0,00 – 0,03 – 0,13 – 0,43 – 0,38	rok 4:	8 – 45 – 53 – 9 – 4 – 11
5: 0,00 – 0,00 – 0,00 – 0,00 – 0,00 – 0,98	rok 5:	8 – 44 – 52 – 9 – 3 – 14
	rok 6:	8 – 43 – 50 – 8 – 3 – 17
	rok 7:	7 – 42 – 49 – 8 – 3 – 19
	rok 8:	7 – 42 – 48 – 8 – 3 – 22
	rok 9:	7 – 41 – 47 – 8 – 3 – 24
	rok 10:	7 – 40 – 46 – 8 – 3 – 26

popisuje silně se zhoršující stav porostu (odumře 40 % z počátečního počtu stromů a průměrná defoliace se zvýší na 44,9 %). Model III (odpovídající poslednímu období) vykazuje nejnižší zhoršování – malý počet odumřelých stromů (20 %) a stabilní průměrnou defoliaci (32,8 %). Model I je kombinací modelu II a III.

Při nezměněných podmínkách prostředí lze očekávat, že lesy odpovídající sledovaným porostům se budou nadále vyvíjet podle scénáře popsaného modelem posledním. Předpokladem však je, že v příštím období nedojde ke krizovým situacím, jakými mohou být například

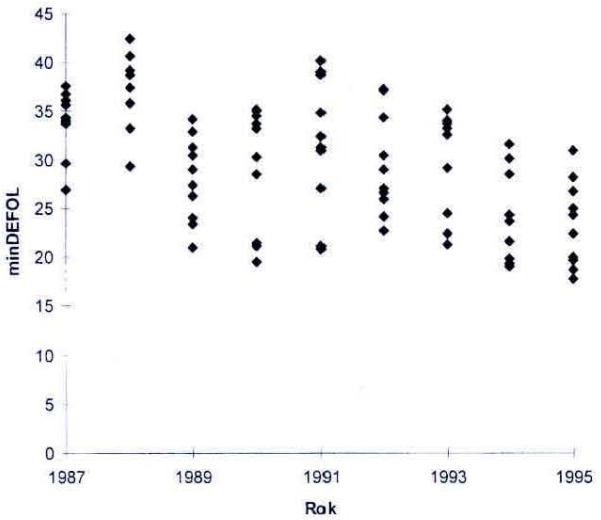
- nepříznivé meteorologické podmínky v konkrétním roce (sucho, teplotní výkyvy proti normálu, inverzní situace kombinované se zvýšením podílu škodlivin v ovzduší);
- výskyt hmyzích škůdců, houbových patogenů apod. Takové faktory by zřejmě způsobily výraznou odchylku od modelovaného vývoje směrem ke zhoršení zdravotního stavu porostů. Je nutné upozornit, že pravděpodobnost výskytu těchto faktorů v Krkonoších je značně vysoká.

INDEX KONDICE LESA

Na základě posouzení dat indexu kondice lesa je nutné konstatovat následující skutečnosti:

- Indexy kondice lesa v různých letech nejsou přímo porovnatelné.
- Byl indikován nárůst rozpětí intervalu hodnot indexu kondice lesa (zvyšuje se zjišťované maximum v hodnocené scéně).
- Existuje porucha v rozdělení frekvencí hodnot podél osy 1–255 v oblasti 150 (resp. 1,0 při vyjádření v původních reálných hodnotách). Z předaných dat nelze usuzovat na způsob vzniku této poruchy. Je možné několik způsobů vysvětlení:
  - pixely s odpovídajícími hodnotami (které nejsou přítomny) byly odstraněny na základě použité masky lesa;
  - těchto hodnot nelze dosáhnout na základě použitého algoritmu pro výpočet indexů kondice lesa;
  - jedná se o chybu, která je determinována použitým systémem SunSparc IPX & EASI/PACE.

Frekvence hodnot indexu kondice lesa v rámci celého území Krkonoš jsou znázorněny na obr. 2, rozdíly



7. Vývoj minimální defoliace ($\mathbf{min}_{DEFOL}$) v posledním období zlepšování stavu porostů (1987–1995) – Development of the minimal defoliation ($\mathbf{min}_{DEFOL}$) during the last period of health state improving (1987–1995)

jsou patrnější při užití klouzavých průměrů frekvence. Sledované scény z pěti let lze charakterizovat následovně:

- roky 1986 a 1990: index kondice lesa nabýval nižších hodnot;
- rok 1986: frekvenční křivka má odlišný charakter od všech následujících (viz zvýšení frekvencí u vyšších hodnot indexu kondice lesa), což ukazuje na možnost vlivu nějakého externího faktoru na celou hodnocenou scénu;
- roky 1984 a 1992: dosaženo průměrně vyšších hodnot indexu kondice lesa, nižší variabilita tohoto indexu a současně nejvyšší maxima frekvenční křivky;
- rok 1995: maximální variabilita indexu kondice lesa a současně dosaženo nejnižšího maxima frekvenční křivky.

Srovnáme-li rozdělení průměrných hodnot indexu kondice lesa v okolí centrálního pixelu studijních ploch (obr. 1), je patrná vzájemná odlišnost všech sledovaných let.

Předpověď rozmístění oblastí kritických z hlediska možného zhoršování stavu porostů smrku lze pravděpodobně provést na základě srovnání indexů kondice lesa v posledních letech. Toto porovnání bylo provedeno na základě barevné syntézy pro dvojice let 1990–1995 a 1992–1995. Přitom je nutné podotknout, že:

- rok 1990 byl atypický z hlediska vztahu šetření pozemního a dálkového průzkumu Země; proto dané porovnání není možné doporučit k dalšímu použití bez kritického zhodnocení opírajícího se o nová data;
- oba obrazy vypadají obdobně;
- pixely s různým charakterem se vyskytují v mozaice, u které lze jen těžko najít určitou pravidelnost, patrná je však akumulace pixelů indikujících potenciální riziko zhoršování zdravotního stavu lesa v místech některých porostních stěn.

Rozdělení pixelů indikujících potenciální riziko zhoršování zdravotního stavu lesa na sledovaném území KRNAP a provedené porovnání se situací v terénu v roce 1996 předběžně potvrdilo, že lze využít zpracovaných satelitních snímků pro objektivizaci predikce vývoje. Například v oblasti Střední hory a Koule bylo indikováno zvýšené riziko poškozování lesních porostů na základě barevné syntézy 1990–1995. Jedná se o oblast relativně nejméně zatíženou znečištěním ovzduší a s menší defoliací smrku. Porosty se tam pravděpodobně dlouho nacházely v latentním stadiu poškozování. Fyziologický stav porostů se bez prokazatelného projevu defoliace podstatně zhoršil až po roce 1990. Zhoršení stavu smrkových porostů bylo v roce 1996 akcelerováno přemnožením kůrovce v této oblasti.

Je nutné upozornit na fakt, že vývoj v posledním období nemusí nutně u konkrétního porostu znamenat, že se bude nadále vyvíjet podle současných mechanismů, protože se může stát, že:

- vývoj právě dojde k určité limitní hodnotě některého parametru, kdy se jeho změna bude projevovat v parametru jiném;
- vývoj je nestabilní, protože ekosystém se vyskytuje v určitém inflexním bodu;
- dojde ke změně jednoho nebo více vnějších parametrů, které změní charakter vývoje stavu lesů.

Posledně jmenovanou změnu lze dokonce v současnosti očekávat vzhledem ke změně průběhu počasí při srovnání let 1996 a 1997 s lety předcházejícími. Pro

III. Kvadráty korelačního koeficientu pro vztah mezi pozemním šetřením defoliace a indexem kondice lesa v závislosti na velikosti uvažovaného okolí centrálního pixelu – Squares of correlation between terrestrially assessed defoliation and indices of forest condition in relation to the width of surrounding of the central pixel

Model pozemního šetření defoliace[1]		DEFOL		$\mathbf{min}_{DEFOL}$	
Model indexu kondice lesa[2]		rs	rs – 0,5 s_{rs}	rs	rs – 0,5 s_{rs}
Velikost okolí[3]	0	0,396	–	0,387	–
	1	0,315	0,306	0,323	0,347
	2	0,326	0,322	0,356	0,390
	3	0,339	0,329	0,394	0,419
	4	0,350	0,376	0,440	0,461
	5	0,363	0,394	0,452	0,478

[1]model for terrestrial assessment, [2]model for forest condition index, [3]size of the surrounding bound (in pixels)

zhodnocení tohoto možného vlivu dosud nejsou k dispozici zpracovaná data.

Celkový korelační koeficient vyjadřuje, jak je úzký vztah mezi pozemním šetřením defoliace a indexem kondice lesa při uvážení všech let sledování (tab. II). Jeho kvadrát (r^2) je uveden v tab. III. V okolí některých studijních ploch v některých letech byla zaznamenána vysoká variabilita indexu kondice lesa, která měla za následek velký rozdíl mezi indexem kondice ve středovém pixelu a průměrem indexu kondice lesa se započtením okolních pixelů. Nejtěsnější vztah mezi pozemním šetřením defoliace a indexem kondice lesa vypočteným ze snímků LANDSAT TM byl zjištěn při použití okolí centrálního pixelu 5 (tj. použití 11 x 11 pixelů), vyjádření defoliace jako minimální defoliace (odpovídá průměrné defoliaci stromů s nejnižším poškozením), vyjádření indexu kondice lesa ve formě **rs** – 0,5 s_{rs} (odpovídá průměru těch pixelů, které mají nejnižší hodnotu indexu kondice lesa). Poté bylo pro jednotlivé roky dosaženo regresních charakteristik uvedených v tab. IV.

IV. Korelační koeficient (**r**) a regresní koeficienty (**a** a **b**) pro lineární regresi $\mathbf{M_k} = \mathbf{a} + \mathbf{b}\ \mathbf{M_t}$ mezi pozemním šetřením defoliace ($\mathbf{M_t} = \mathbf{min_{DEFOL}}$) a indexem kondice lesa ($\mathbf{M_k} = \mathbf{rs} - 0{,}5\ s_{rs}$; při šíři okolí 5 pixelů) v jednotlivých letech sledování – Correlation (**r**) and regression coefficients (**a** and **b**) of the linear regression $\mathbf{M_k} = \mathbf{a} + \mathbf{b}\ \mathbf{M_t}$ between terrestrially assessed defoliation ($\mathbf{M_t} = \mathbf{min_{DEFOL}}$) and forest condition indices ($\mathbf{M_k} = \mathbf{rs} - 0.5\ s_{rs}$; surrounding of 5 pixels in width) during five evaluated years

Rok[1]	r	a	b
1984	0,541	107,33	+0,449
1986	0,691	80,42	+1,282
1990	–0,696	148,58	–1,090
1992	0,914	83,11	+0,941
1995	–0,476	126,47	–0,337

[1]year

ZÁVĚR

1. Existuje vztah mezi defoliací a indexem kondice lesa počítaným ze satelitních snímků LANDSAT TM. Tento vztah však není jednoznačný a mění se rok od roku. Nelze vytvořit jednoznačný model vývoje lesů v Krkonoších na základě indexů kondice lesa. Proto tyto indexy nelze přímo využít v provozní praxi např. pro plánování postupu imisních těžeb, jak se dosud často předpokládalo.
2. Pro další zhodnocení významu indexu kondice lesa a zjištění možnosti jeho použití by bylo vhodné masku lesů vytvořit na základě satelitních snímků toho roku, pro který jsou indexy kondice lesa počítány. Tím by bylo možné retrospektivně postihnout úbytek lesa a zjistit, za jakých podmínek (v podmínkách jakých hodnot indexu kondice lesa) úbytek lesa probíhal. Až tímto způsobem by bylo možné odhadnout, kde bude možné očekávat nejvýraznější poškození lesních porostů.
3. Modelování vývoje zdravotního stavu lesa na základě přechodových matic je poměrně přesné. Při využití permanentního sledování defoliace (pro definici aktuálních přechodových matic) na relativně malém souboru ploch vybraných podle určitých požadavků, jednorázovém sledování defoliace na zájmových lokalitách a aplikaci vytvořeného modelu lze poměrně přesně odhadnout další vývoj stavu těchto vybraných lokalit. Tento postup je možné kombinovat s užitím barevných syntéz rastrů konstruovaných na základě indexů kondice lesa pro odhad rozmístění lokalit se zvýšeným rizikem dalšího vývoje.
4. Studovaný soubor ploch je zřejmě nedostatečný, protože charakter všech ploch je obdobný. V důsledku absence ploch v porostech mladšího a středního věku nepokrývá tento soubor celou variabilitu podmínek poškození, v nichž se smrkové lesy v Krkonoších nacházejí.

Literatura

BOSSEL, H. – METZLER, W. – SCHÄFER, H., 1985. Dynamik des Waldsterbens. Mathematisches Modell und Computer-simulation. Berlin etc.

BREDEMEIER, M. – TIKTAK, A. – VANHEERDEN, K., 1995. The solling Norway spruce site. Ecol. Model., 83: 7–15.

CHALUPSKÝ, J., 1992. Enchytraeids (*Annelida, Enchytraeidae*) in soils of deteriorated mountain forest sites in the Krkonoše and the Beskydy Mts. In: MATĚJKA, K. (ed.), Investigation of the mountain forest ecosystems and of forest damage in the Czech Republic. Proc. of the workshop held in České Budějovice on March 17 and 18 in 1992. České Budějovice: 81–85.

EMMER, I. M., 1996. Forest damage and related environmental factors in the Krkonoše Mts. In: VACEK, S. (ed.), Monitoring, výzkum a management ekosystémů na území KRNAP. Opočno, VS VÚLHM: 21–27.

LOKVENC, T. et al., 1992. Zalesňování Krkonoš. Opočno, VÚLHM: 111.

LORENZ, M., 1995. International co-operative programme on assessment and monitoring of air pollution effects on forests – ICP-Forests. Wat. Air. Soil. Pollut., 85, 1221–1226.

MANDL, P., 1985. Pravděpodobnostní dynamické modely. Praha, Academia: 181.

MATĚJKA, K., 1993. Monitoring stavu lesů České republiky. Metodický komentář, seznam ploch a některé dosavadní výsledky. Praha, VÚLHM Jíloviště-Strnady: 68.

MATĚJKA, K., 1994. Monitoring of the forest status in the Czech Republic. Recent results and prospects. In: MATĚJKA, K. (ed.), Investigation of the forest ecosystems and of forest damage. Lowland and submountain forests and monitoring of the forest status. Praha, FGMRI: 146–154.

PARLOW, E., 1996. Progress in environmental remote sensing research and applications. Rotterdam, A. A. Balkema: 496.

SAARENMAA, H. – PERTTUNEN, J. – VAKEVA, J. – NIKULA, A., 1994. Object-Oriented Modeling of Tasks

and Agents in Integrated Forest Health Management. AI Applications, 8: 43–59.

SCHANDA, E., 1976. Remote sensing for environmental sciences. Ecological Studies, Vol. 18, Springer Verlag: 367.

SCHWARZ, O., 1995. Application of geographic information system on analysis of natural environment and forest stand as a precondition for regeneration of forests in the National Park Krkonoše Mts. In: MATĚJKA, K. (ed.), Investigation of the forest ecosystems and of forest damage. Processes in forest ecosystems and their external functions. Praha, IDS: 68–77.

SINGH, R. B., 1995. Global environmental change. Rotterdam, A. A. Balkema: 320.

SLOVIK, S., 1996a. Early needle senescence and thinning of the crown structure of *Picea abies* as induced by chronic SO_2 pollution. 1. Model deduction and analysis. Glob. Change Biol., 2: 443–458.

SLOVIK, S., 1996b. Early needle senescence and thinning of the crown structure of *Picea abies* as induced by chronic SO_2 pollution. 2. Field data basis, model results and tolerance limits. Glob. Change Biol., 2: 459–477.

STEFFEN, W. L. – CRAMER, W. – PLOCHL, M. – BUGMANN, H., 1996. Global vegetation models: Incorporating transient changes to structure and composition. J. Veg Sci., 7: 321–328.

ŠÍMA, M., 1994. Využití družicových dat LANDSAT při hodnocení ústupu lesa a geoekologických faktorů jeho obnovy v Krkonoších. [Dílčí zpráva, projekt PPŽP MŽP GA/78/93 Rekonstrukce lesních ekosystémů v Krkonošském národním parku, rukopis.] Vrchlabí, Správa KRNAP: 13.

TESAŘ, V. – ANDĚL, P. – SCHWARZ, O. – VACEK, S., 1982. Poznatky o míře ovlivnění lesních porostů Krkonoš imisemi na úrovni roku 1979. Opera corcont., 19: 79–94.

UNEP 1995. Forest damage in Central European Mountains. Final report of a large area experiment for forest damage monitoring in Europe using satellite remote sensing. Geneva, UNEP: 97.

VACEK, S., 1987. A mathematical model of defoliation dynamics of spruce forests due to immissions. Commun. Inst. For. Čechoslov., 15: 55–73.

VACEK, S., 1989. Dynamika změn ve smrkobukových porostech pod vlivem imisí. Práce VÚLHM, 74: 239–275.

VACEK, S., 1990. Analýza autochtonních smrkových populací na strmé stráni v Krkonoších. Opera corcont., 27: 59–103.

VACEK, S., 1995. Decline dynamics in mixed spruce-beech stands of the Krkonoše Mts. In: MATĚJKA, K. (ed.), Investigation of the forest ecosystems and of forest damage. Processes in forest ecosystems and their external functions. Praha, IDS: 119–129.

VACEK, S., 1996. Vývoj zdravotního stavu lesních porostů na TVP v Krkonoších. In: VACEK, S. (ed.), Monitoring, výzkum a management ekosystémů na území KRNAP. Opočno, VS VÚLHM: 28–43.

VACEK, S., (ed.), 1996. Monitoring, výzkum a management ekosystémů na území KRNAP. Opočno, VS VÚLHM: 350.

VACEK, S. – LEPŠ, J., 1987. Changes in the horizontal structure in a spruce forest over a 9-year period of pollutant exposure in the Krkonoše Mountains, Czechoslovakia. Forest Ecol. Manag., 22: 291–295.

VACEK, S. – LEPŠ, J., 1991. Použití Leslieho matic pro predikci vývoje smrkových prostů pod vlivem imisí. Lesnictví, 37: 133–149.

VACEK, S. – LEPŠ, J., 1996. Spatial dynamics of forest decline: the role of neighbouring trees. J. Veget. Sci., 7: 789–798.

VACEK, S. – VAŠINA, V., 1991. Poškození smrkových porostů imisně ekologickými vlivy. Opera corcont., 28: 105–130.

WINKLER, P., 1993. Remote sensing for monitoring the changing environment of Europe. Rotterdam, A. A. Balkema: 318.

Došlo 16. 1. 1998

THE NORWAY SPRUCE (*PICEA ABIES*) HEALTH STATE DEVELOPMENT MODELLING WITH SATELLITE DATA IN THE KRKONOŠE MTS.

K. Matějka[1], S. Vacek[2], O. Schwarz[3]

[1]*IDS, Plzeňská 86, 150 00 Praha 5*
[2]*Forestry and Game Management Research Institute, Research Station, 517 73 Opočno*
[3]*Krkonoše National Park Administration, Dobrovského 3, 543 11 Vrchlabí*

The area of the Krkonoše Mts. pertains to the Central European region with occurrence of global large-area forest damage. It is one of the reasons for a great volume of data on the forest development since the 70's (beginning of more important air pollution impact).

The goal of the paper is aimed at a possible processing of data on the forest health state in the Krkonoše area. Several evaluations of this data have been available using different points of view. However, complex processing with a comparison of different data sources has not been published up to present time.

We have used two kinds of data: terrestrially assessed defoliation of trees, and satellite imagery of the scanner LANDSAT TM. Together 10 permanent study plots with the Norway spruce (*Picea abies*) under distinctive environmental conditions within the Krkonoše area were selected. The long-term defoliation estimation series were made in these plots. Defoliation of all

living trees of each plot was given using six classes [class 0 represents 0–9% defoliation; 1 10–29%; 2 30–49%; 3 50–69%; 4 70–99%; 5 100% (dead tree)]. Assessments were made each year during the study. The plots are localised inside of rasters forest condition indices computed on the basis of remotely sensed data.

The health state of each plot was evaluated using a set of variables on the basis of tree defoliations (average defoliation over all living trees, **DEFOL**; standard deviation of defoliation, $\mathbf{s}_{DEFOL}$; minimal defoliation, $\mathbf{min}_{DEFOL}$; frequencies in six classes of defoliation, $\mathbf{F}_0,...,\mathbf{F}_5$). Two periods of development were distinguished: the year 1987 is considered as a limit.

A model of the forest health development is presented. It consists on calculation of transition matrices with elements evaluating probability of change health status (defoliation) from one to the other defoliation class. Three examples of development of a forest during 10 years were calculated. The model with transition matrix adequate to the last period (1987–1995) shows stabilisation of defoliation and slow tree dying.

Indices of forest condition were calculated in the years 1984, 1986, 1990, 1992 and 1995. Results from different years are not comparable directly regarding the method of index calculation.

The relation between terrestrially assessed tree defoliation and forest condition index is expressed as a linear regression model $\mathbf{M}_k = a + b\ \mathbf{M}_t$ (variable $\mathbf{M}_k$ represents a function of forest condition index; $\mathbf{M}_t$ is a function of defoliation). The relationship is not stable and its parameters varied from year to year. It is the main reason of impossibility to construct a model based on forest condition index. However, a comparison of two years in form of colour synthesis of two rasters can discover localities with higher possibilities of changes in forest health state.

Kontaktní adresa:

Ing. Karel Matějka, IDS, Plzeňská 86, 150 00 Praha 5, Česká republika