

## SÚČASNÝ STAV A PERSPEKTÍVY VÝSKUMU MIKROKLÍMY RASTLINNÝCH PORASTOV

František Matejka, Jaroslav Rožnovský, Tatjana Hurtalová, Dalibor Janouš

### Úvod

Zemský povrch si neustále vymieňa s najnižšími vrstvami ovzdušia hmotu a energiu. Týmto spôsobom sa do atmosféry dostáva teplo a vodná para, čo ovplyvňuje teplotné a vlhkosťné pomery najmä v prízemnej vrstve atmosféry. Intenzita výmeny tepla a vodnej pary medzi zemským povrchom a atmosférou značne závisí od vlastností povrchu. Táto skutočnosť má za následok vznik miestnych zvláštností klímy, ktoré sa menia v pomerne malých vzdialenostiach alebo časových intervaloch. Na pomenovanie týchto zvláštností klímy, spôsobených charakterom a vlastnosťami zemského povrchu použijeme pojem mikroklima.

V procese vytvárania mikroklimy má teda významnú úlohu zemský povrch a jeho vlastnosti. Preto v týchto súvislostiach často hovoríme o aktívnom povrchu, na ktorom prebieha premena dopadajúceho slnečného žiarenia na teplo. V konkrétnych prípadoch môže aktívny povrch tvoriť vodná hladina, pôda, les, lúka, pole, atď. Z teoretického i praktického hľadiska je zaujímavý prípad, v ktorom je aktívny povrch vytvorený rastlinným porastom. V tejto situácii sú to hlavne charakteristiky rozhrania medzi rastlinným porastom a atmosférou, ktoré ovplyvňujú meteorologické podmienky v prízemnej vrstve atmosféry a vytvárajú špecifickú mikroklimu rastlinného porastu.

Podľa Bioklimatologického slovníka je mikroklima rastlinného porastu (fytoklima) *režim mikroklimatických dejov, ktorý sa vytvára pod vplyvom zapojených rastlinných porastov v prízemnej vrstve atmosféry* (Bioklimatologický slovník, 1970).

V zmysle tejto definície sa výskumom mikroklimy rastlinných porastov zaoberá viacero odvetví meteorológie, ale aj niektorých ďalších prírodovedných disciplín. V prvom rade je to **fytoklimatológia**, ktorá v plnej šírke skúma problematiku mikroklimy rastlinných porastov ale aj **mikroklimatológia** zameraná, okrem iného, aj na výmenu hmoty a energie medzi rastlinným porastom a okolitým ovzduším. Mikroklima rastlinných porastov spadá aj **fytobioklimatológia**, študujúcej vzťahy medzi klímou a rastlinnou zložkou biosféry (Meteorologický slovník, 1993). Z výsledkov výskumu mikroklimy rastlinných porastov vychádza aj **agrometeorológia**, ktorá študuje vplyvy počasia a podnebia na poľnohospodárstvo (Meteorologický slovník, 1993). Táto pomerne široká definícia už chápe ako súčasť agrometeorológie aj **agroklimatológiu**, ktorej cieľom je *aplikácia poznatkov z klimatológie v poľnohospodárstve*.

Keď porovnáme definíciu fyto-klimatológie s obsahom pojmu **ekológia**, pod ktorým rozumieme *vedu o vzťahoch organizmov a spoločenských k ich okolitému prostrediu včítane jeho klimatickej zložky* (Meteorologický slovník, 1993), je zrejmé, že zameranie fyto-klimatológie je veľmi blízke k k časti aktivít spadajúcich do poľa pôsobnosti ekológie.

Charakteristiky fyto-klimy sú však významné aj pokiaľ ide o výskum dynamiky vody v nenasýtenej zóne pôdneho profilu pod rastlinnými porastami. Mikroklimatické pomery zahrňujúce aj charakteristiky rozhrania medzi rastlinným porastom a prízemnou vrstvou atmosféry predstavujú totiž okrajové podmienky pre evapotranspiráciu, ako aj pre pohyb pôdnej vody v koreňovej zóne. Je teda celkom pochopi-

tel'né, že účelovo zameraný výskum mikroklímy rastlinných porastov sa postupne stal aj súčasťou **hydrologie**.

Výskum mikroklímy rastlinných porastov je teda náplňou viacerých odvetví meteorológie a ďalších geovedných disciplín. Na túto skutočnosť zareagovala Svetová meteorologická organizácia, rozšírením definície agrometeorológie, podľa ktorej *„Agricultural meteorology is concerned with discovering, defining and applying knowledge of the interactions between meteorological and hydrological factors, and biological systems to practical use in agriculture including horticulture, animal husbandry and forestry. Agricultural meteorology is concerned with processes that occur from the soil layer of the deepest plant and tree roots through the air layer near the ground in which crops and woods grow and animals live, to the highest levels of interest to aerobiology, the latter with particular reference to the effective transport of seeds, pollen and insects” (WMO, 1981).*

Toto široké ponímanie tematického zamerania agrometeorológie zahŕňa prakticky celú oblasť výskumu mikroklímy rastlinných porastov, čo má za následok, že súčasný stav výskumu fytoклímy úzko súvisí s terajším stupňom rozvoja agrometeorológie. Zhodnotenie súčasného stavu výskumu mikroklímy rastlinných porastov, ani posúdenie možností jeho ďalšieho vývoja, však nie je možné bez pohľadu do minulosti.

### **Metodické aspekty výskumu mikroklímy rastlinných porastov**

Pravdepodobne prvú známu zmienku o zvláštnostiach stavu ovzdušia na ryžovom poli, ktorá by sa mohla dávať do súvisu so súčasným pojmom fytoклímy, obsahujú archeologické nálezy datované do prvého storočia pred n. l., ktorých súčasťou je aj zhrnutie skúseností čínskeho roľníka menom Fan Šeng Ši, ktoré boli s vysvetľujúcim komentárom publikované

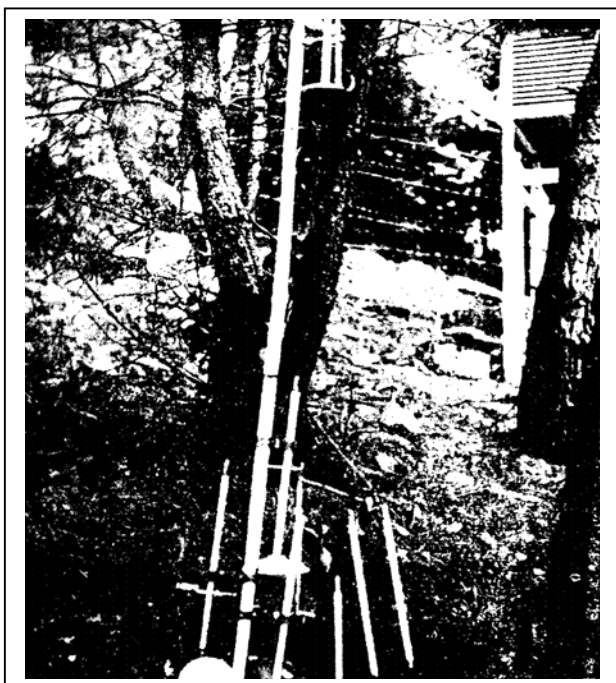
v anglickom preklade (Shih Sheng Han, 1974). Zachovali sa aj ďalšie dôkazy o tom, že už od počiatku nášho letopočtu roľníci vedeli o vplyve počasia na rast, vývoj a úrodu poľných plodín, avšak súčasne im bola, aspoň čiastočne známa aj skutočnosť, že rastlinné porasty môžu vplývať na svoje okolie. Svedčí o tom stručný prehľad histórie agrometeorológie od čias Aristotela, ktorý spracoval Rosenberg (1989). Prevažná väčšina historických zdrojov informácií z tohto prehľadu sa týka výlučne porastov poľných plodín a prvé úvahy o možných účinkoch lesov na pôdu a okolité ovzdušie sa objavili až oveľa neskôr. Tento časový posun je celkom pochopiteľný, vzhľadom na to, že v hierarchii hodnôt ľudskej spoločnosti zaujímali po dlhé stáročia poľné plodiny ako základný zdroj obživy dôležitejšie postavenie než lesy, poskytujúce drevnú surovinu, čo vytváralo silnú motiváciu pre rozvoj poznania v tejto oblasti.

Samozrejme, všetky poznatky, týkajúce sa fytoклímy mali až do začiatku éry meteorologických meraní len kvalitatívny charakter a boli získané ako osobná skúsenosť metódou „úspech-omyl“. Na tomto mieste sa však žiada pripomenúť, že ani meranie meteorologických prvkov nemalo spočiatku zreteľný vplyv na rozvoj výskumu mikroklímy rastlinných porastov. Prvou príčinou tohto stavu bolo, že metodika meteorologických meraní a prístrojová technika neumožňovala spočiatku tak podrobný pohľad na časové a priestorové polia meteorologických prvkov, ako by si to vyžadoval výskum mikroklímy. Okrem toho, trvalo pomerne dlhý čas, kým sa vyvinuli interpretačné metódy vhodné pre mikroklimatologický prístup k výsledkom štandardných meteorologických meraní.

Zhodou okolností sa oba tieto nedostatky odstránili takmer súčasne. Koncom 19. storočia sa začali vykonávať prvé merania v lesných porastoch, ktoré z metodologickej a technickej stránky možno už jednoznačne hodnotiť ako mikroklimatické (Ebermayer, 1879, Müttrich, 1880, Liburnau, 1890,). Len o niečo neskôr, v prvých

dvoch dekádach 20. storočia, sa začali vo väčšom rozsahu aplikovať na súbory nameraných údajov štatistické metódy regresnej a korelačnej analýzy. V tomto období možno hovoriť o širokej a intenzívnej aplikácii štatistických metód vo výskume mikroklimy rastlinných porastov, čo sa odrazilo aj v niektorých pasážach hodnotiacej správy predsedu britskej Kráľovskej meteorologickej spoločnosti, ktorý pravdepodobne prvý raz použil na stránkach odborného meteorologického periodika termín „agricultural meteorology“, keď napísal: „...the general subject of agricultural meteorology is there beginning to attract attention ...“. K tomuto obdobiu sa viaže aj taký mimoriadny edičný čin, akým bolo vydanie doteraz aktuálnej monografie „Climate Near the Ground“ (Geiger, 1927), ktorej piate vydanie vyšlo v roku 1995.

Dá sa povedať, že tento trend pokračoval aj v nasledujúcich štyroch dekádach, kedy „agricultural meteorology and the closely-related micrometeorology took root and began to flourish after the Second



*Obr. 1. Mikroklimatická stanica používaná v päťdesiatych rokoch minulého storočia pre výskum mikroklimy lesných porastov (Intribus, 1961).*

World War in several European countries“ (Monteith, 2000). Toto obdobie rozkvetu výskumu fytoaklimy v rôznych odvetviach meteorológie a hraničných geovedných disciplínach vytvorilo nevyhnutné podmienky pre vznik špeciálneho vedeckého časopisu orientovaného na problematiku vzájomných vzťahov medzi vegetáciou a atmosférou, ktorý začal v roku 1968 vychádzať pod názvom *Agricultural Meteorology* a od roku 1984 rozšíril svoje zameranie a svoj názov na *Agricultural and Forest Meteorology*.

Spoločným znakom všetkých prác z oblasti výskumu fytoaklimy bolo spočiatku tematické zameranie na sledovanie a analýzu odchýlok mikroklimatických pomerov od makroklimy, resp. zisťovanie rozdielov medzi mikroklimou lesa a mikroklimatickými pomermi nad porastami poľných plodín a nad pôdou bez porastu. Tomuto hlavnému cieľu zodpovedala aj metodika výskumu. Jeho ťažiskovou časťou boli epizodické mikroklimatické merania, ktoré boli technicky zabezpečené komplexom mikroklimatických staníc, pozostávajúcich z kovovej alebo drevenej tyče, na ktorej boli v niekoľkých výškových hladinách upevnené stančné teplometry, ktorých snímacia časť bola chránená pred účinkom slnečného žiarenia tienením. V blízkosti stančičky boli vo viacerých hĺbkach inštalované pôdne teplometry Savinova. Okrem toho sa v jednej výškovej hladine, obvykle 150 cm nad povrchom pôdy, merala rýchlosť vetra ručným anemometrom a vlhkosť vzduchu aspiračným psychrometrom (obr. 1). K výbave mikroklimatickej stančičky niekedy patrilo aj Picheho výparomer, poskytujúci hodnoty blízke potenciálnej evapotranspirácii.

Mikroklimatické merania sa spočiatku vykonávali len v najnižších vrstvách ovzdušia, do výšky 1,5 až 2 metre, neskôr tyč meteorologickej stančičky nahradil

vyšší stožiar, umožňujúci rozmiestniť meracie prístroje aj v korunách stromov alebo nad nimi. Odčítavanie údajov z meracích prístrojov inštalovaných vo väčších výškach bolo v období pred zavedením automatizovaných meracích systémov riešené periskopickou sústavou zrkadiel a ďalekohľadu (Rauner, 1972). Vzhľadom na technické komplikácie s inštaláciou meracích prístrojov a registráciou ich údajov sa až do zavedenia automatizovanej meracej techniky mikroklimatické merania vykonávali v korunách stromov a nad nimi len veľmi zriedkavo. Tomu zodpovedali aj získavané výsledky, ktoré sa vzťahovali väčšinou k najnižšej dvojmetrovej vrstve ovzdušia nad lesnou pôdou. Toto obmedzenie však bolo kompenzované veľkým množstvom získaných informácií o situácii v lesných porostoch s rôznym druhovým zložením a hustotou, rastúcich v odlišných pôdnych geografických a klimatických podmienkach, pričom veľká pozornosť bola venovaná vplyvu pestovateľských zásahov na mikroklimatické pomery. Typickou formou prezentácie výsledkov boli grafické znázornenia denných priebehov a tautochrón sledovaných prvkov. Takáto stručná charakteristika zodpovedá stavu výskumu mikroklimy lesa až do šesťdesiatych rokov minulého storočia.

Šesťdesiate roky minulého storočia priniesli niekoľko zásadných zmien vo výskume fytklímy a v chápaní súvislostí medzi vegetáciou, hydrosférou a atmosférou, ktoré podstatným spôsobom ovplyvnili aj ciele, zameranie a metodický prístup výskumu mikroklimy lesa.

V druhej polovici minulého storočia sa popri zreteľnej zmene zamerania, cieľov a koncepcie výskumu fytklímy ešte výraznejšie rozvinula meracia technika a metodika výskumu. Na jednej strane sa týče na inštaláciu teplomerov zmenili na meteorologické stožiare alebo veže dosahujúce výšku až 100 metrov (obr. 2) a miesto stupnice prístroja slúži automatická meracia ústredňa so špecializovaným programovým vybavením. Súčasne sa však snímače meraných meteorologických prvkov minia-

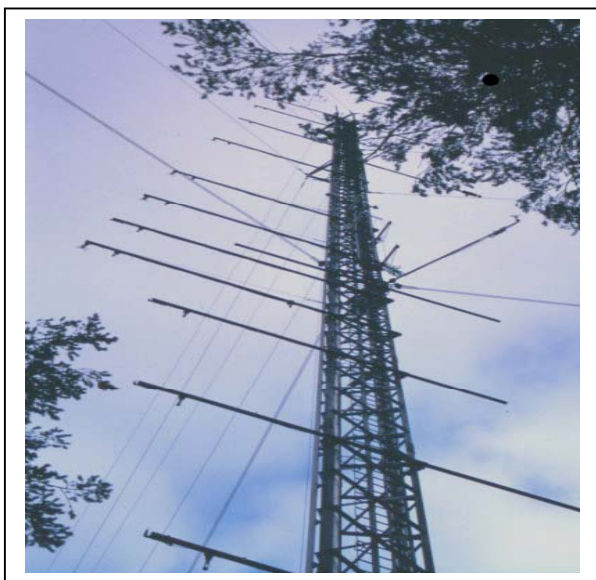
turizujú a upravujú tak, aby čo možno najmenej ovplyvnili okolité prostredie (obr. 3). V niektorých prípadoch sa v lesníckej bioklimatológii používajú aj distančné merania (Byrne a kol., 1979).

Rozvoj meracej techniky a metodiky mikroklimatických meraní bol v tomto období sprevádzaný prehĺbením poznania v celej oblasti výskumu interakčných vzťahov v systéme pôda-vegetácia-atmosféra. V tejto súvislosti možno spomenúť zavedenie pojmu vodný potenciál listov (Slayter a Taylor, 1960), zahrnutie rezistencie vyparujúceho povrchu do Penmanovej rovnice (Monteith, 1965) a širšie využívanie metód porometrie v ekofyziológii. Takto sa vytvoril akýsi spoločný vedecký základ medzi ekológmi fyziológmi, hydrológmi a meteorológmi, ktorý im spoločne umožnil nový prístup k výskumu vzájomných vzťahov medzi vegetáciou a atmosférou pri použití „fyzikálneho konceptu v biologickom kontexte“ (Monteith, 1980). V tomto období sa v exaktných vedných disciplínach začal silne akcentovať systémový prístup k analýze viacložkových štruktúr. Dovtedajší experimentálny a teoretický výskum v hydrológii, ekológii a meteorológii priviedol k jednoznačnému zisteniu, podľa ktorého je mikroklima jedným z dôsledkov interakcií medzi vegetáciou a jej atmosférickým a pôdnym prostredím, čo znamenalo, že pri výskume fytklímy je nevyhnutné brať do úvahy celý systém „pôda-lesný porast-atmosféra“. Tým sa vlastne tematické zameranie výskumu mikroklimy rastlinných porastov v podstate stotožnilo s cieľmi fytoeklimatológie.

V rámci výskumu mikroklimy rastlinných porastov sa však už v päťdesiatych rokoch minulého storočia viacerí autori zaoberali energetickou bilanciou porastov poľných plodín (Miller, 1981) alebo lesných porastov, hlavne vo vzťahu k evapotranspirácii (Baumgartner, 1956). Toto zameranie sa v ďalších dvoch desaťročiach ešte prehĺhilo v dôsledku častejšieho využívania výsledkov mikroklimatic-

kých profilových meraní na výpočet turbulentných tokov a postupného širšieho uplatnenia meracích aparátúr, umožňujúcich stanovenie toku hybnosti, tepla, vodnej pary a oxidu uhličitého metódou pulzácií. Záujem o problematiku výmeny tepla a vodnej pary medzi lesným porastom a atmosférou bol motivovaný aj tou skutočnosťou, že evapotranspirácia, alebo tok tepla spotrebovaného na výpar, ako jej energetický ekvivalent, má veľký význam z hľadiska vodného režimu lesa, ale aj ako

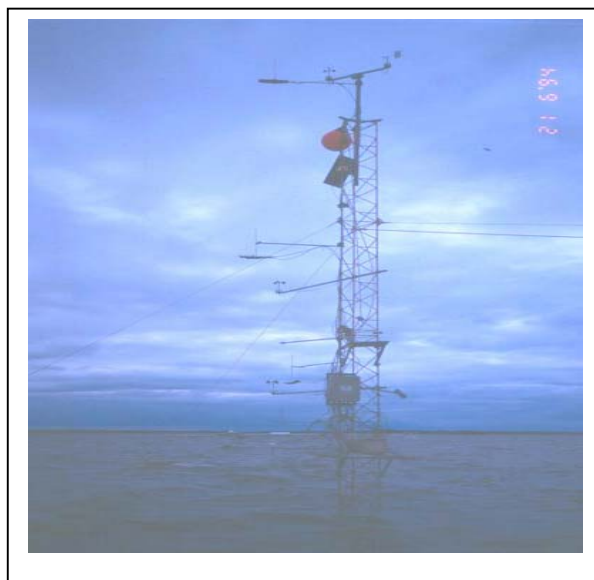
mikroklimatický faktor, určujúci množstvo vodnej pary, ktorá sa z vyparujúceho povrchu dostáva do najnižších vrstiev ovzdušia, od čoho zase závisí evaporačné ochladzovanie mikroklimaticky aktívneho povrchu. Výrazný vplyv rastlinných porastov na štruktúru rovnice ich energetickej bilancie názorne ilustruje obrázok č. 4, vzťahujúci sa k porastu kukurice v Žabčiciach, na pokusných plochách Mendelovej poľnohospodárskej a lesníckej univerzity.



Rozvoj meracej techniky a metodiky mikroklimatických meraní bol v tomto období sprevádzaný prehĺbením poznania v celej oblasti výskumu interakčných vzťahov v systéme pôda-vegetácia-

*Obr. 2. Pohľad na 100 m vysoký stožiar pre profilové meteorologické merania vykonávané v rámci medzinárodného výskumného programu NOPEX v strednom Švédsku.*

atmosféra. V tejto súvislosti možno spomenúť zavedenie pojmu vodný potenciál listov (Slayter a Taylor, 1960), zahrnutie rezistencie vyparujúceho povrchu do Penmanovej rovnice (Monteith, 1965) a širšie využívanie metód porometrie v ekofyziológii. Takto sa vytvoril akýsi spoločný vedecký základ medzi ekológmi fyziológmi, hydrológmi a meteorológmi,



ktorý im spoločne umožnil nový prístup k výskumu vzájomných vzťahov medzi vegetáciou a atmosférou pri použití „fyzikálneho konceptu v biologickom kontexte“ (Monteith, 1980). V tomto období sa

*Obr. 3. Komplex mikroklimatických meraní vykonávaných v rámci medzinárodného výskumného programu NOPEX v strednom Švédsku.*

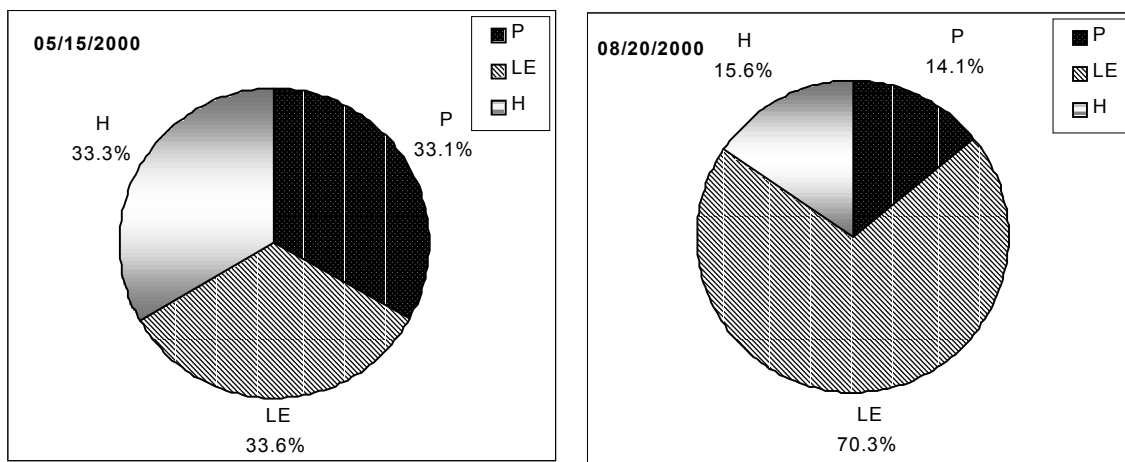
v exaktných vedných disciplínach začal silne akcentovať systémový prístup k analýze viacložkových štruktúr. Dovedajší experimentálny a teoretický výskum v hydrológii, ekológii a meteorológii privedol k jednoznačnému zisteniu, podľa ktorého je mikroklima jedným z dôsledkov interakcií medzi vegetáciou a jej atmosférickým a pôdnym prostredím, čo znamena-

lo, že pri výskume fytoklímy je nevyhnutné brať do úvahy celý systém „pôda-lesný porast-atmosféra“. Tým sa vlastne tematické zameranie výskumu mikroklímy rastlinných porastov v podstate stotožnilo s cieľmi fyto bioklimatológie.

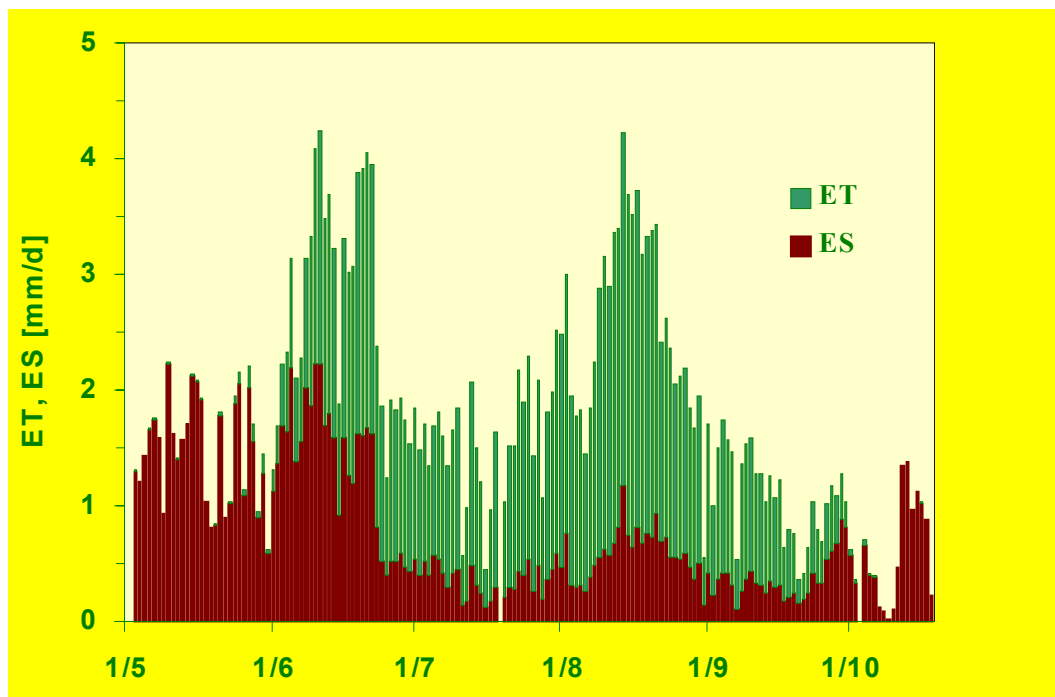
V rámci výskumu mikroklímy rastlinných porastov sa však už v päťdesiatych rokoch minulého storočia viacerí autori zaoberali energetickou bilanciou porastov poľných plodín (Miller, 1981) alebo lesných porastov, hlavne vo vzťahu k evapotranspirácii (Baumgartner, 1956). Toto zameranie sa v ďalších dvoch desaťročiach ešte prehĺhilo v dôsledku častejšieho využívania výsledkov mikroklimatických profilových meraní na výpočet turbulentných tokov a postupného širšieho uplatnenia meracích aparátúr, umožňujúcich stanovenie toku hybnosti, tepla, vodnej pary a oxidu uhličitého metódou pulzácií. Záujem o problematiku výmeny tepla a vodnej pary medzi lesným porastom

a atmosférou bol motivovaný aj tou skutočnosťou, že evapotranspirácia, alebo tok tepla spotrebovaného na výpar, ako jej energetický ekvivalent, má veľký význam z hľadiska vodného režimu lesa, ale aj ako mikroklimatický faktor, určujúci množstvo vodnej pary, ktorá sa z vyparujúceho povrchu dostáva do najnižších vrstiev ovzdušia, od čoho zase závisí evaporačné ochladzovanie mikroklimaticky aktívneho povrchu. Výrazný vplyv rastlinných porastov na štruktúru rovnice ich energetickej bilancie názorne ilustruje obrázok č. 4, vzťahujúci sa k porastu kukurice v Žabčiciach, na pokusných plochách Mendelovej poľnohospodárskej a lesníckej univerzity.

V súčasnosti možno tiež detailne analyzovať aj štruktúru evapotranspirácie (obr č 5), čo má nielen teoretický význam z hľadiska výskumu fytoklímy, aj aplikačne možnosti pri optimalizácii vodného režimu porastov poľných plodín.



Obr. 4. Pomery mesačných súm toku tepla do pôdy (P), turbulentného toku tepla (H) a toku tepla spotrebovaného na výpar (LE) k radiačnej bilancii v mesiacoch máj a august 2000 pre porast kukurice.



Obr. 5. Sezónne zmeny denných súm transpirácie porastu kukurice (ET) a výparu z pôdy (ES) v rastovom období roku 2000 na pokusnom poli v Žabčiciach

Výskum energetickej bilancie lesných ekosystémov umožnil identifikovať najvýznamnejšie špecifikum lesných porastov, ktoré má za následok zreteľné odlišenie mikroklimy lesa od mikroklimy porastov poľných plodín. Takéto rozlíšenie je možné na základe toho, že teplota a vlhkosť vzduchu v mikroklimatickom priestore zapojených lesných porastov je ovplyvnená existenciou dvoch zdrojov vodnej pary, keď jedným z nich je povrch lesnej pôdy a druhý, obvykle významnejší zdroj, je lokalizovaný v hornej časti korún, kde dochádza k najintenzívnejšej transpirácii. V súvisi s tým sa lesné porasty pokladajú za štruktúrovanú dvojzdrojovú mikroklimaticky aktívnu vrstvu (Prošek, 1994).

Výsledky štúdia vodného režimu lesných porastov ukázali, že transpirácia a následkom toho aj štruktúra rovnice energetickej bilancie lesa značne závisí od hodnôt priechodovej rezistencie pre prenos vodnej pary (Jarvis, 1980). Táto fyziologická regulácia transpirácie je základnou príčinou spätnej väzby existujúcej medzi

vegetáciou a atmosférou, pričom tato spätná väzba pôsobí ako stabilizačný faktor teplotného režimu prízemnej vrstvy atmosféry nad zalesnenými oblasťami (Grant a Baldocchi, 1992).

Výsledky analýzy vzájomného vzťahu medzi turbulentými tokmi tepla a vodnej pary v prízemnej vrstve atmosféry nad homogénnymi porastami svedčia o tom, že vegetácia zásadne mení vlastnosti rozhrania medzi mikroklimaticky aktívnym povrchom porastu a priliehajúcimi vrstvami ovzdušia (Delworth a Manabe, 1989). Na základe výsledkov početných prác sa ukázalo, že práve vlastnosti tohto rozhrania sú dôležité pre plnenie klimatickej funkcie vegetácie ako celku a lesných porastov zvlášť.

Pokrok dosiahnutý pri analýze výmeny tepla a vodnej pary medzi vegetáciou a atmosférou umožnil kvantifikovať mieru tesnosti vzťahu medzi porastom a atmosférou z mikroklimatického hľadiska, čo má zvlášť veľký význam v prípade lesných porastov. Na tento účel bol navrh-

nutý tzv. decoupling factor, ktorého hodnoty sa pohybujú od nuly, pre prípad extrémne tesnej väzby medzi porastom a atmosférou, po jednotku pre porast z mikroklimatického hľadiska nenaviazaný na okolité ovzdušie (Jarvis a McNaughton, 1986).

### **Interdisciplinárny charakter výskumu mikroklimy rastlinných porastov**

Spomedzi parametrov rozhrania medzi porastom a atmosférou je rezistencia porastu pre prenos vodnej pary veličinou, ktorá je významná z hľadiska viacerých vedných odvetví, ktorými sú popri meteorológii najmä hydroológia a fyziológia rastlín. Rezistencia porastu je určená rezistenciou listov a vertikálnou distribúciou listov v poraste, preto rezistenciu porastu ovplyvujú všetky tie faktory, ktoré vplývajú na hodnoty rezistencie listov. Je známe, že spomedzi parametrov okolitého prostredia prieduchy citlivo reagujú najmä na zmeny radiačných, teplotných a vlhkosťných pomerov v najbližšom okolí listov a obsahu vody v pôde.

Vplyv zmien pôdnej vlhkosti na atmosférické procesy je už dlhší čas predmetom intenzívneho výskumu. Spočiatku bola v tomto smere venovaná pozornosť dôsledkom anomálii pôdnej vlhkosti na časovú a priestorovú variabilitu oblačnosti a zrážok. Walker and Rowntree (1977) ukázali, ako pozitívne anomálie pôdnej vlhkosti interagujú s atmosférou. Shukla and Mintz (1982) zhodnotili zmeny intenzity evapotranspirácie a teploty aktívneho povrchu spôsobené zmenami pôdnej vlhkosti. Rowntree and Bolton (1982) analyzovali zmeny niektorých klimatických charakteristík v súvislosti s výskytom anomálií pôdnej vlhkosti.

Neskôr, sa začala brať do úvahy viac prirodzená variabilita pôdnej vlhkosti, než jej anomálie. Delworth and Manabe (1988) zistili, že pôdna vlhkosť vplýva na atmosférické procesy prostredníctvom zmien štruktúry rovnice energetickej bilancie aktívneho povrchu, pričom ukázali, že

zmeny pôdnej vlhkosti ovplyvujú hodnoty Bowenovho pomeru, teplotu a vlhkosť na úrovni aktívneho povrchu.

Dá sa očakávať, zmeny pôdnej vlhkosti vplývajú nielen na charakteristiky klímy vo veľkom meradle ale ešte intenzívnejšie na fytoklímu. Z výsledkov modelovej simulácie procesu vytvárania fytoklímy vyplynulo, že už pomerne malé zmeny pôdnej vlhkosti v koreňovej zóne môžu mať za následok rozdielne denné chody teploty a vlhkosti vzduchu nad zapojenými porastami poľných plodín. Ukázalo sa tiež, že pokles pôdnej vlhkosti môže mať za následok výrazný rast teploty vzduchu a sýtošného doplnku v porovnaní s prípadom dostatočne vlhkej pôdy, pri rovnakom príkone radiačnej energie do systému pôda-porast-atmosféra.

V tejto situácii je zrejmé, že pre kvantitatívny popis procesu vytvárania fytoklímy sú veľmi dôležité aj poznatky z oblasti hydrologie, resp. hydroopedológie. V tejto súvislosti ide hlavne o určovanie hydrofyzikálnych charakteristík pôdy a retenčných čiar a o informácie o časovej a priestorovej variabilite pôdnej vlhkosti v koreňovej zóne. Na tomto mieste sa žiada pripomenúť, že práve požiadavky hydrologie a hydroológov, ktorí často potrebovali stanoviť evapotranspiráciu ako jednu zo zložiek rovnice vodnej bilancie, významne stimulovali rozvoj metód výpočtu tokov vody v systéme pôda-rastlinný porast-atmosféra, čo malo veľký význam aj z hľadiska fyto klimatológie pre spresnenie poznatkov o mikroklimatických účinkoch rastlinných porastov.

Všimnime si teraz bližšie proces fyziologickej kontroly tokov tepla a vodnej pary v prízemnej vrstve atmosféry. Na tomto mieste treba pripomenúť, že z hľadiska stanovenia charakteristík rozhrania medzi rastlinným porastom a atmosférou nie je rozhodujúca prieduchová rezistencia listu alebo jednej rastliny ale rezistencia povrchu porastu ako celku. Túto celkovú rezistenciu porastu určuje okrem rezistencií jednotlivých listov aj celková plocha listov a jej vertikálna distribúcia v poraste. Okrem



toho sa zistilo, že v procese fyziologickej kontroly transpirácie hrá popri prieduchovom aparáte dôležitú úlohu aj koreňový systém. Intenzitu transpirácie totiž významne ovplyvňuje pomer plochy koreňov k ploche listov. Platí, že čím je tento pomer väčší, tým účinnejšie dokáže porast čerpať vodu z koreňovej zóny pôdneho profilu. Teda, porast s dobre rozvinutým koreňovým systémom transpiruje za inak rovnakých podmienok intenzívnejšie, než porast so slabo rozvinutým koreňovým systémom. To má za následok, že z porastu s dobre rozvinutým koreňovým systémom sa do atmosféry dostáva viac vodnej pary, než za rovnaký čas z porastu s málo rozvinutým koreňovým systémom a teplota povrchu porastu s dobre rozvinutým koreňovým systémom je nižšia než teplota povrchu porastu s málo rozvinutým koreňovým systémom. V konečnom dôsledku je vzduch nad porastom s málo rozvinutým koreňovým systémom teplejší a suchší, než nad porastom s dobre rozvinutým koreňovým systémom (Matejka a Huzulák, 1995).

Koncom sedemdesiatych rokov sa zistilo, že chovanie prieduchového aparátu ovplyvňujú okrem vonkajších činiteľov aj niektoré fytohormóny, ako napr. kyselina abscisová, ktorá sa uvoľňuje v štádiu začínajúceho vodného stresu z chloroplastov (Mansfield et al., 1990). Tento biochemický prenos informácií medzi koreňovou sústavou a prieduchovým aparátom bol už zohľadnený aj pri tvorbe matematických modelov transportu vody v systéme pôdaporast-atmosféra (Lafolie et al., 1991).

Z uvedeného vyplýva, že pri kvantifikácii charakteristík rozhrania medzi rastlinným porastom a atmosférou sa nemožno vyhnúť ani fyziologickým a biochemickým aspektom prieduchovej regulácie transpirácie, čo v konečnom dôsledku znamená, že výskum mikroklimy rastlinných porastov musí mať nevyhnutne interdisciplinárny charakter, keďže ide o problematiku spoločnú prinajmenšom pre meteorológiu, hydrológiu a ekológiu.

## **Aplikačné možnosti výsledkov výskumu mikroklimy rastlinných porastov**

Napriek vtedajšiemu empirickému prístupu k problematike fyto-klimy a jej popisnému hodnoteniu, predseda britskej Kráľovskej meteorologickej spoločnosti už koncom 19. storočia konštatoval, že „je len málo vied tak tesne navzájom prepojených ako meteorológia, poľnohospodárstvo a záhradníctvo“ (Mawley, 1898). Pre prípad agrometeorológie je toto konštatovanie možno ešte priliehavjšie. Najmä posledné tri desaťročia poskytujú dostatok dôkazov o tom, že aj výsledky výskumu mikroklimy rastlinných porastov nachádzajú prostredníctvom agrometeorológie široké uplatnenie nielen v poľnohospodárstve a lesníctve, ale aj v oblasti ochrany a tvorby životného prostredia.

Výsledky mikroklimatických meraní vykonávaných v porastoch poľných plodín a tesne nad nimi poskytujú vstupné údaje nevyhnutné pre matematické modelovanie procesu tvorby úrod poľných plodín a produkcie biomasy v lesných ekosystémoch. Výsledky monitorovania mikroklimy rastlinných porastov tiež slúžia ako podklad pre predikciu výskytu chorôb a škodcov v agroekosystémoch

Okrem toho však tieto experimentálne podklady možno využiť aj pri fyziologickej indikácii vodného stresu a následnej optimalizácii závlahového režimu. V tejto súvislosti sa v aridných klimatických oblastiach často využíva teplota povrchu porastov poľných plodín ako indikátor vodného stresu (Idso, 1982). Výsledky monitorovania mikroklimy rastlinných porastov sú potrebné aj ako vstupné údaje do matematických modelov, simulujúcich vplyv pôdneho sucha na evapotranspiráciu a jej štruktúru (Matejka, et al., 2001, 2002)

## **Perspektívy výskumu mikroklimy rastlinných porastov.**

Dá sa odôvodnene predpokladať, že

d'alší vývoj výskumu mikroklimy rastlinných porastov bude i naďalej silne stimulovaný na jednej strane potrebami rozvoja niektorých odvetví meteorológie, hydrológie a ekofyziológie a na druhej strane aktuálnymi požiadavkami poľnohospodárskej a lesníckej praxe..

Už teraz je zrejmé, že kľúčom k lepšiemu chápaniu vzájomných vzťahov medzi pôdou, vegetáciou a atmosférou je hlbšie poznanie zákonitostí, ktorými sa riadi reakcia prieduchového aparátu lesných porastov i porastov poľných plodín na zmeny parametrov okolitého prostredia. Táto problematika je ešte stále nedostatočne preskúmaná a každý nový, exaktný a kvantifikovateľný poznatok v tejto oblasti určite prispeje k spresneniu existujúcich matematických modelov simulujúcich procesy genézy a dynamiky mikroklimy rastlinných porastov, ako aj hydrologické a fyziologické procesy v poľných a lesných ekosystémoch.

Súčasnú možnosť distančných meraní a metód diaľkového prieskumu Zeme majú v súčasnosti obrovský potenciál aj ako zdroje informácií o mikroklimě rastlinných porastov. Nateraz však efektívnemu využitiu týchto možností bráni absencia zodpovedajúcich interpretačných metód. S tým súvisia aj doteraz nevyriešené problémy pri prechode z makromeradla do mikrometeorologickej úrovne označovanom obvykle ako downscaling.

V súčasnosti je veľkou výzvou pre environmentálne vedy problematika dopadu očakávanej zmeny klímy na životné prostredie. Napriek tomu, že zmena klímy predstavuje globálny problém v globálnom meradle, predikcia reakcie rastlinných porastov na zmenu charakteristík atmosférickej zložky ich životného prostredia sa musí začať riešiť na mikroklimatologickej úrovni. Táto situácia predstavuje silný stimul aj pre rozvoj výskumu mikroklimy rastlinných porastov.

Požiadavka na efektívne využívanie všetkých dostupných energetických zdrojov si vyžaduje spresnenie metód stanovenia štruktúry rovnice energetickej bilancie rast-

linných porastov. V tejto súvislosti najväčší problém predstavuje energetická bilancia nehomogénnych povrchov, kde stále zostávajú mnohé metodické otázky nedoriešené.

Charakteristickou črtou výskumu mikroklimy rastlinných porastov je v posledných dvoch desaťročiach zreteľná snaha riešiť špeciálne problémy z oblasti fytoeklimatológie v širších súvislostiach, čo sa často prakticky realizuje formou veľkých medzinárodných výskumných programov, kde má výskum fytoeklimy svoje pevné miesto ale súčasne nemožno striktno ohraničiť pole jeho pôsobnosti. Podobné aktivity z oblasti výskumu mikroklimy lesa boli aj súčasťou viacerých medzinárodných výskumných programov, ako napr. BAHC (Hutjes a Kabát, 1998), NOPEX (Halldin a kol., 1995), EUROFLUX (Aubinet a kol., 2000) a ďalších. Tento trend teamovej práce je pri výskume mikroklimy rastlinných porastov v súčasnosti úplnou nevyhnutnosťou, a preto sa táto tendencia bude v budúcnosti ešte posilňovať.

Ešte viac a naliehavějších otázok vzniká v oblasti výskumu mikroklimy rastlinných porastov v súvisí s praktickými požiadavkami poľnohospodárstva a lesníctva. Ich zoznam by mohol začínať komplexnosťou a dostupnosťou informácií o fytoeklimě v operatívnom režime. a pokračovať širokou škálou agrometeorologických aplikácií, smerujúcich k aplikácii všetkých dostupných meteorologických poznatkov v poľnohospodárstve, s cieľom dosiahnuť najefektívnejšie využitie agroklimatického potenciálu pri zvyšovaní kvality a kvantity poľnohospodárskej produkcie. Súčasne s existenciou naliehavých praktických požiadaviek kladených na výstupy z oblasti výskumu mikroklimy rastlinných porastov však platí, že tieto poznatky „budú užitočne len vtedy, ak dokážu inšpirovať poľnohospodárov a lesníkov k tomu, aby boli schopní profitovať z rozvoja vlastných možností“ (Monteith, 2000).

## **Záver**

Historický vývoj výskumu mikroklimy rastlinných porastov možno rozdeliť

na dve etapy, líšiac sa cieľmi výskumu, metodickým prístupom, použitou prístrojovou technikou a konečne aj kvalitou a kvantitou získaných výsledkov. Za časovú hranicu medzi týmito dvoma obdobiami možno považovať šesťdesiate roky minulého storočia. V prvom z týchto období bola základnou koncepciou výskumu mikroklimy lesa snaha stanoviť a analyzovať odchýlky jednotlivých charakteristík mikroklimy lesa od mikroklimatických pomerov nad pôdou bez porastu. V tejto fáze boli získané výsledky formulované väčšinou popisným spôsobom s dôrazom na geografické ponímanie mikroklimy.

Rýchly rozvoj poznania fyzikálnych aspektov ekofyziologických procesov v lesných porastoch sprevádzaný zdokonaľovaním meracej techniky a metód základného spracovania nameraných údajov mal silný vplyv aj na vývoj lesníckej mikroklimatológie. Súčasne je zreteľne badateľný posun od pôvodného viac geograficky orientovaného mikroklimatického výskumu k fyzike prízemnej vrstvy atmosféry. Tak sa aj fytoeklimatológia vyvinula v posledných štyroch desaťročiach na kvantitatívnu vednú disciplínu rešpektujúcu ako fyzikálne tak aj biologické princípy. Okrem toho, metodický prístup k výskumu mikroklimy lesných porastov sa postupne posúval k parametrizácii a kvantifikácii procesov v celej mikroklimatickej sfére s vyústením do matematického modelovania vzájomných vzťahov v systéme „pôda-lesný porast-atmosféra“.

V súčasnosti je poľnohospodárska a lesnícka bioklimatológia orientovaná na poznávanie, syntézu a aplikácie poznatkov o interakcii meteorologických a hydrologických faktorov v biologickom

systéme. Pritom sú predmetom výskumu procesy prebiehajúce v priestore od koreňovej zóny pôdneho profilu po hornú hranicu prízemnej vrstvy atmosféry. Orientácia mikroklimatického výskumu v rastlinných porastoch je teraz stimulovaná hlavne globálnymi problémami z oblasti ochrany a využívania biofondu. V posledných troch desaťročiach začala byť klimatická funkcia vegetácie chápaná zo všeobecnejších aspektov a fytoeklimatológia sa stala integrálnou súčasťou výskumu poľnohospodárskych a lesných ekosystémov.

Napriek mnohým významným výsledkom získaným doteraz pri výskume mikroklimy rastlinných porastov je stále aktuálna požiadavka hlbšieho poznania zákonitostí vplyvu rastlinných porastov na interakcie medzi biosférou a atmosférou a dopad týchto interakcií na stabilitu klimatického systému v súčasnosti i v podmienkach predpokladanej zmeny klímy. Výskum mikroklimy rastlinných porastov sa stáva dôležitou súčasťou širšie koncipovaného bádania, od ktorého sa očakávajú odpovede na naliehavé otázky o vplyve vegetácie na distribúciu zrážok a na retenčnú schopnosť zalesnených území. Na druhej strane, aj vplyv atmosferických faktorov na rast, vývoj a produkčné funkcie rastlinných porastov a tiež mikroklimatické dôsledky agrotechnológií a pestovateľských zásahov zostávajú stále aktuálne. Je však príznačné, že v posledných desaťročiach stále silnejú v oblasti fytoeklimatológie interdisciplinárne väzby, čo vytvára predpoklady pre vyšší stupeň zovšeobecnenia získaných poznatkov a pre ich efektívnejšiu aplikáciu.

**Pod'akovanie:** Autori d'akujú Grantovej agentúre Českej republiky (projekt č. 526/03/1104) a Vedeckej grantovej agentúre MŠ SR a SAV (grant č. 2/2093/22) za čiastočnú finančnú podporu tejto práce.

## Zoznam použitej literatúry

- [1] Aubinet, M., Grelle, A., Ibrom, A., Rannik, Ü., Moncrief, G., Foken, T., Kowalski, A. S., Martin, P. H., Berbigier, P., Clement, T., Elbers, J., Granier, A., Grünwald, T., Morgenstern, K., Pelegaard, K., Rebman, C., Snuders, W., Valentini, R., Vesala, T., 2000: Estimation of the net carbon and water exchange of forest: The EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research*, 30, 114-175.
- [2] Baumgartner, A., 1956: Untersuchungen über den Wärme und Wasserhaushalt eines jungen Wäldes. *Ber. deut. Wetterdienstes*, 5, 1-53.
- [3] Byrne, G. F., Begg, J. E., Fleming, P. M., Dunin, F. X., 1979: Remotely sensed land cover temperature and soil water status – a brief review. *Remote Sens. Environ.*, 8, 291-305.
- [4] Delworth, T. L., Manabe, S., 1989: The influence of soil wetness on near surface at-mospheric variability. *J. Clim.*, 2: 1447-1462.
- [5] ] Delworth, T. L., Manabe, S.: The influence of potential evaporation on the variabilities of simulated soil wetness and climate. *J. Clim.*, 1, 1988, s. 523-547.
- [6] Ebermayer, E., 1879: Folgen der Entwaldung für Klima und Wasser. *Zeitschr. d. Öster-reich, Geselsch. f. Meteorol.*, 6, 37-44.
- [7] Geiger, R., Aron, R. H., Todhunter P., 1995: *Climate Near the Ground*. Vieweg, Braunschweig.
- [8] Grant, R. F., Baldocchi, D. D., 1992: Energy transfer over crop canopies: simulation and experimental verification. *Agric. Forest. Meteorol.*, 61, 129-149.
- [9] Halldin, S., Gottschalk, L., van de Gried, A., Grynning, S.E., Heikinheimo, M., Hogstrom, M, U., Jochum A., Lundin, L.C., 1995: Science plan for NOPEX. Technical Report No. 12, Uppsala University, 38 s.
- [10] Hooker, R. H., 1921: Forecasting the crops from the weather. *Quart. J. Meteorol. Soc.*, 47, 75-99.
- [11] Hutjes R. W. A., Kabat, P., 1998: BAHC revised science agenda for 1998 – 2001. *BAHC News*, No. 6, 3-7.
- [12] Choudhury, B. J., Monteith, J. L.: A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surface. *J. R. Meteorol. Soc.*, 114, 1988, s. 373-398.
- [13] Jarvis, P. G., 1980: Stomatal conductance, gaseous exchange and transpiration. In: J.Grace, D.E.Ford, P.G.Jarvis (ed.): *Plants and their atmospheric environment*. Oxford, Blackwell Sci. Publ., 175-204.
- [14] Jarvis, P. G., 1988: Non-Water stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agric. Meteorol.*, 27, 59-70.
- [15] Jarvis, P. G., McNaughton, K. G., 1986: : Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. *Adv. Ecol. Res.*, 15, 1-49.
- [16] Kolektív autorov, 1970: *Bioklimatologický slovník (terminologický a explikativny)*, Praha, ČSBS.
- [17] Kolektív autorov, 1993: *Meteorologický slovník výkladový a terminologický*. Praha, MŽP ČR.

- [18] Lafolie, F.- Bruckler, L.- Tardieu, F.: Modeling root water potential and soil-root water transport. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 1991, s. 1203-1212.
- [19] Liburnau, L., 1890: Resultate forstl. meteorologischen Beobachtungen. *Mitt. a. d. forstl. Vers. Österr.*, 12-13.
- [20] Mansfield, I, A.- Hetherington, A. M.- Atkinson, C, J: Some current aspects of stomatal physiology. *A. Rev. Pl. Physiol.*, 41, 1990, s. 557
- [21] Matejka, F., Huzulák J.: Analysis of relationships between winter wheat leaf water potential and atmospheric factors. *Biologia* 50, 1, 1995, s. 105-114.
- [22] Matejka, F., Hurtalová, T., Rožnovský, J., Chalupníková, B., 2001: Effect of soil drought on evapotranspiration of a maize stand. *Contrib. Geophys. and Geodesy*, 31, 455-466.
- [23] [22] Matejka, F., Rožnovský, J., Hurtalová, T., Janouš, D., 2002: Effect of soil drought on evapotranspiration of a young spruce forest. *Journal of Forest Science*, 48, 166-172.
- [24] Mawley, E., 1898: Weather influences on farm and garden crops. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 24, 57-82.
- [25] Miller, D, H., 1981: *Energy at the Surface of the Earth – An Introduction to the Energetics of Ecosystems*. New York, Academic Press.
- [26] Monteith, J. L., 1965: Evaporation and environment. *Proc. Symp. Soc. Exp. Biol.*, 19, 205-234.
- [27] Monteith, J. L., 1980: Coupling of plants to the atmosphere. In: J. Grace, D. E. Ford, P. G. Jarvis (ed.): *Plants and their atmospheric environment*. Oxford, Blackwell Sci. Publ., 1-29.
- [28] Monteith, J. L., 2000: Agricultural meteorology: evolution and application. *Agric. and Forest Meteorol.*, 103, 2000, 5-9:
- [29] Müttrich, A., 1880: Über den Einfluss des Waldes auf die periodischen Veränderungen der Lufttemperatur. *Z. f. Forst. und Jagdw.* 22, 109-134.
- [30] Prošek, P., 1994: Mikroklima lesa. In: Šamaj, F., Prošek, P., Čabajová, Z.: *Agrometeorológia a bioklimatológia*. Bratislava, Univerzita Komenského, 306 s.
- [31] RAUNER, Ju., L., 1972: *Teplovoj balans rastitel'nogo pokrova*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 209 s.
- [32] Rosenberg, N. J., 1989: Speculations of the future of agricultural and forest meteorology. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 70, 784-786.
- [33] Rowntree, P. R., Bolton, J. R.: Simulation of the atmospheric response to soil moisture anomalies over Europe. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 109, 1983, s. 501-526.
- [34] Shih Sheng Han, 1974: *An Agriculturalist book of China*. On Fang Sheng Chih Shu. Science Press, Beijing.
- [35] Slayter, R, C., Taylor, S. A., 1960: Terminology in plant-soil-water relations. *Nature*, 187, 922-924.
- [36] Shukla, J., Mintz, Y.: Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate. *Science*, 215, 1982, s. 1498-1501.

- [37] Walker, J. M., Rowntree, P. R.: The effect of soil moisture on circulation and rainfall in a tropical model. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 103, 1977, 29-46.
- [38] WMO, 1981: *Agricultural Meteorological Practices*. Ženeva, WMO 134.

## CONTEMPORARY STATUS AND PERSPECTIVES OF THE RESEARCH ON MICROCLIMATE OF PLANT CANOPIES

**Summary:** The terms of microclimate and phytoclimate are defined in opening parts of the contributions and simultaneously the state of the art of the research on the plant canopy microclimate is briefly described. The historical development of phytoclimate is divided into two stages with the milestone in the six decade of the last century. These years meant a transition from the concept of the description of the differences between the microclimatic regime of the bare soil and plant canopies to a quantification of interrelations between vegetation and surrounding atmosphere. The interdisciplinary aspects of the phytoclimatology are emphasised and the idea of a physical concept in a biological context is explained.

The present conditions of knowledge in the area of microclimatology of plant canopies is characterised using the results obtained by the research on aerodynamic characteristics of the canopies, their energy balance and interrelations in the soil-vegetation-atmosphere system. In connection with this, the role of the stomatal resistance an atmospheric feedback is discussed from aspects of mass and energy transfer between plant canopies and the atmosphere. The existing possibility to quantify the coupling between plant canopies and the atmosphere is discussed. The basic differences in the microclimate of agricultural crops and the forest are specified. The present state of the research on the microclimate of plant canopies is illustrated using the results obtained during the last decade on the area of Moravia.

The last part of the contributions evaluates the applicability of the results obtained by the microclimatic research in agriculture and forestry. Finally, the common features of microclimatology and agricultural meteorology are found. The possibilities of application of the results obtained in the research on microclimatology are summarised in the long-term time horizon, in the area of methodical approaches and by the operative decision. In the conclusion, the question which seems to be inevitable for the further development of the phytoclimatology are indicated.

### Adresy autorov:

RNDr. Taťjana Hurtalová, CSc., RNDr. František Matejka, CSc., Geofyzikálny ústav SAV, Dúbravská cesta 9, 845 28 Bratislava, SR.  
e-mail: geoftahu@savba.sk, eofmate@savba.sk

Ing. Dalibor Janouš, CSc., Ústav ekologie krajiny AV ČR, Na sádkách 7, 370 05 České Budějovice, ČR.  
e mail: ejanous@brno.cas.cz

RNDr. Ing. Jaroslav Rožnovský, CSc., MZLU, Zemědělská 1, 813 00 Brno, ČR.  
e-mail: roznovsky@chmi.cz