

Využití bezpilotních prostředků v zemědělství 1. část



Bezpilotní prostředek s křídly (letadlo)

S rozvojem a dostupností technologií spojených s metodami snímání zemského povrchu pomocí satelitních snímků s vysokým prostorovým rozlišením se pro rostlinnou produkci otevírají zároveň nové možnosti pro lokální operativní monitorování a sběr dat z malé vzdušné výšky, které rozvíjejí a naplňují koncept integrované produkce a precizního zemědělství. Atraktivní alternativou jsou bezpilotní prostředky, které nabízejí rychlou, včasnou a levnou detekci problémů v oblastech růstu, výživy, ochrany rostlin, agrotechnických zásahů, kontroly a hodnocení opatření kvantitativního i kvalitativního charakteru.

Zemědělská produkce, a rostlinná zvláště, je mimořádně citlivá na abiotické i biotické podmínky prostředí a agrotechnickým zásahům. V řízení zemědělské výroby je strategické rozhodování a časování zásahů s ohledem na proměnlivost přírodního prostředí (počasí), polní heterogenitu (půda, voda, živiny, odrůdy, choroby, škůdci) a fluktuaci trhu (ceny komodit, dotace, zemědělská politika) klíčové a rozhoduje o krátkodobé efektivitě i dlouhodobé ekonomické prosperitě. Jakýkoliv nástroj, který umožní včas podchytit dynamiku těchto procesů a účinně s nimi v kontextu přírodních a ekonomických podmínek pracovat, přinese zemědělcům přidanou hodnotu v podobě optimalizace nákladů, zisku a pozitivních externalit spojených s kvalitou produkce a ochranou životního prostředí. Jedním z nejslibnějších nástrojů jsou v současné době bezpilotní prostředky, které představují novou technickou platformu pro senzory potřebné pro sběr dat v zemědělství. Oproti tradičním pilotním platformám (letadla, helikoptéry) disponují řadou předností: bezpečnost, opakovatelnost, nízké operační i pořizovací náklady, menší omezení spojené s meteorologickými podmínkami (bezpilotní prostředky létají pod mraky). Souběžná dostupnost všech těchto výhod je však závislá na velikosti a typu bezpilotních prostředků, výběru použitých senzorů, cíle letecké kampaně a legislativních omezení.



Plně vybavená hexakoptéra osazená senzorovou technikou v podobě termokamery, šestikanálové multispektrální kamery a přehledové RGB kamery, které jsou připevněny na podvěsu (gimbálu) zajišťujícím trojosou stabilitu a snímání v požadovaném úhlu a orientaci

Dálkový průzkum Země v zemědělství

Jedním z limitujících faktorů ovlivňujících komerční využití precizního zemědělství jsou náklady spojené s odebráním a analýzou půdních či rostlinných vzorků. Takové vzorky by měly zajistit dostatečné pokrytí zkoumaného pozemku a zároveň poskytnout informaci o aktuálním stavu půdy či rostlin. S rozvojem technologií využívajících bezkontaktní snímání se tak otevírá cesta, jak snížit náklady na získání požadovaných informací. Rozhodnutí, jaký druh vstupních informací použít, záleží jak na technických parametrech samotného senzoru, tak i na nákladech pořízení sledované informace, či na účelu použití. Mezi technické parametry pořízeného snímku, od kterých

se odvíjí i účel využití, patří především prostorové, spektrální, časové či radiometrické rozlišení.

Mezi velmi oblíbené zdroje dat patří snímky z družice Landsat, které lze v současné době stáhnout z webové aplikace zdarma. Benefitem těchto multispektrálních snímků je několik spektrálních pásem (od viditelné části spektra přes NIR, SWIR až po termální pásmo). Nevýhodou těchto snímků je prostorové rozlišení 30 m/pixel a časové rozlišení – opakovatelnost 16 dní. Snímky z družice Landsat jsou vhodné především na zachycení variability porostu či odhad výnosu. Snímky s velmi vysokým prostorovým rozlišením poskytují např. družice QuickBird či WorldView-2. Prostorové rozlišení



Pilot s operátorem při přípravě snímání pomocí softwaru umožňujícího velkoplošný sběr dat programováním trasy na základě GPS souřadnic

těchto snímků se pohybuje od 50 cm. Nevýhodou je spektrální rozlišení, které čítá pouze pásma viditelné části spektra a NIR pásmo. Snímání stejného místa se opakuje zpravidla za 1–7 dní. Tyto snímky jsou komerční. Nevýhodou družicových snímků je závislost na oblačnosti a jejich využitelnost je tedy v podmínkách České republiky značně omezená. Výhodou družicových snímků je možnost aplikace na velkých půdních blocích.

Potřebujeme-li snímat pouze část pozemku nebo malou plochu a účel snímání je velmi specifický (detekce plevelů, přítomnost chorob...), je vhodné použít bezpilotní prostředek s příslušným senzorem. Prostorové rozlišení snímků z bezpilotního prostředku se pohybuje od několika centimetrů a je závislé na výšce stroje nad povrchem. Časové rozlišení je pak závislé na potřebách zadavatele.

Co je potřeba pro létání aneb UAV

Populární termín dron má původ ve vojenské terminologii. V civilním sektoru je prosazován název z anglického označení unmanned aerial vehicle (UAV), tedy bezpilotní prostředek, bezpilotní letadlo (UA) nebo bezpilotní systém (UAS). Úředním jazykem se jedná o "...systém skládající se z bezpilotního letadla, řídicí stanice a jakéhokoliv dalšího prvku nezbytného k umožnění letu jako například komunikačního spojení a zařízení pro vypouštění a návrat...".

Vybírat budeme mezi bezpilotním prostředkem s křídly (letadlo), nebo multikoptérou (má 4–8 vrtulí, žádná křídla).

Pevné křídlo je vynikající pro snímání velkých ploch během jednoho letu, pokud je užitečný náklad lehký a je k dispozici dostatek místa na vzlet a přistání. Naopak multikopterové letadlo je vhodné do míst s omezenými vzletovými a přistávacími možnostmi, při požadavku na snímání menších ploch nebo při potřebě vysokého rozlišení snímků, kde se používají těžší senzory či více senzorů současně.

Kromě samotného bezpilotního prostředku je k ovládní potřeba řídicí radiostanice (raději dvě – druhá může kontrolovat ovládní kamery), zdroj energie (akumulátory), gimbál (sta-

Tab. 1a – Výhody a omezení různých typů bezpilotních prostředků pro zemědělské aplikace

Typ	Rychlost	Pokrytí plochy	Rozlišení	Plocha přistání	Odolnost větru
Křídlo (letadlo)	40–90 km/h	1–8 km ² /let	do 1,5 cm/px	velká	40–90 km/h
Multikoptéra	0–54 km/h	0,3 km ² /let	do 0,1 cm/px	malá	do 40 km/h

Tab. 1b – Výhody a omezení různých typů bezpilotních prostředků pro zemědělské aplikace

Typ	Nosnost	Hmotnost	Doba letu	Bezpečnost
Křídlo (letadlo)	obvykle stovky gramů	0,7–3 kg	50 minut	velká
Multikoptéra	do 3 kg, max. 10 kg	3,6–25 kg	do 0,5 kg: 15–20 min. do 3 kg: 10–15 min do 6 kg: 7–10 min	střední

bilizovaný závěs kamery/nákladu). Nutností je software pro plánování a provedení letu (např. UgCS, Mission Planner) s počítačem, nebo tabletem. Důležitou součástí jsou nyní i padákové záchranné systémy.

Pro zpracování dat ze senzorů pro mapové účely, konstrukci 3D modelů krajiny či tvorbu vegetačních indexů (např. NVDI) je potřebné vlastnit a ovládat specializovaný software (například Pix4D) či software pro obrazovou analýzu (SigmaScan, CorePlayer, ImageJ).

S bezpilotním systémem není možné létat bez registrace, pilotní certifikace a povolení k leteckým pracím, resp. leteckým pracím pro vlastní potřebu. Získání patřičných registrací a povolení je v současnosti proces časově (3–6 měsíců) i finančně náročný (10–20 tis. Kč). Více informací je k dispozici na webu Úřadu pro civilní letectví: www.caa.cz/letadla-bez-pilota-na-palube.

Nezbytností je pojištění na škody vůči třetím osobám (povinné pojištění), je možné si též sjednat pojištění nesených předmětů či havarijní pojištění (více například www.apbl.cz/cz/pojisteni-informace). Neméně důležité je zajištění kvalitního školení obsluhy a následný servis, který zajistí bezpečný provoz bezpilotního prostředku.

Legislativa bezpilotního létání

Dohled nad provozem, certifikací bezpilotních prostředků a licencování pilotů vykonává v České republice Úřad pro civilní letectví (ÚCL). Provoz bezpilotních prostředků spadá do kategorie civilního leteckého provozu, a proto i pro něj platí závazná legislativní pravidla (zákon č. 49/97 Sb. O civilním letectví a jeho prováděcí vyhláška 108/97 Sb.) Pro bezpilotní systémy je určující Doplněk X leteckého předpisu L2, který mimo jiné stanoví,

Tab. 2 – Půdní vlastnosti stanovitelné senzorem přímo (D) a nepřímo (I) podle jeho typu; (Adamchuk 2011, upravení Kroulík)

Půdní vlastnosti/typ senzoru	Gama-záření	Rentgenové záření	Optický	Mikrovlnný	Rádiové vlny	Elektrický	Elektrochemický	Mechanický
Chemické vlastnosti								
Celkový uhlík	D	D	D					
Organický uhlík	I		D					
Anorganický uhlík	I		D					
Celkový dusík	D	D	D					
Nitrátový dusík			I		I	I	D	
Celkový fosfor	D	D	I					
Extrahovatelný fosfor								
Celkový draslík	D	D	D					
Extrahovatelný draslík			I				I	
Další hlavní živiny	D	D	D				I	
Mikroprvky	D	D	D					
Železo celkové	D	D	D		I			
Oxidy železa	I		D		I			
Těžké kovy	D	D	I					
KVK	I		I			I		
pH půdy	I		I		D		D	
Zasolenost půdy					D		D	
Fyzikální vlastnosti								
Barva			D					
Vlhkost	D		D	D	D	D	I	
Vodní potenciál	I					D		I
Zrnitostní složení	I		I		I	I		I
Jílové minerály	I	D	D					I
Odpor půdy								D
Objemová hmotnost	I		I		D			I
Pórovitost								D
Hloubka prokořenění					I			D

že lety lze provádět pouze na vzdálenost omezenou přímým vizuálním kontaktem pilota s bezpilotním prostředkem (bez pomocných vizuálních pomůcek, prakticky 200–500 m), a to tak, aby pilot mohl správně vyhodnocovat dohlednost, překážky a okolní letecký provoz.

Let s bezpilotním prostředkem smí být prováděn jen takovým způsobem, aby nedošlo k ohrožení bezpečnosti létání ve vzdušném prostoru, osob a majetku na zemi a životního prostředí.

Let bezpilotním prostředkem není možno provádět kdekoli. Pokud ÚCL nepovolí jinak, lze létat ve vzdušném prostoru třídy G (do 300 m nad povrchem země), v letištní provozní zóně neřízeného letiště ATZ (kružnice od

středu letiště o poloměru 5,5 km) pouze při splnění podmínek stanovených provozovatelem letiště a na základě koordinace s letištní letovou informační službou (AFIS), v řízeném okruhu letiště (CTR, MCTR) do vzdálenosti ohraničené kružnicí o poloměru 5,5 km od středu letiště a do výšky 100 m nad povrchem země (v ostatních případech jsou vyžadována povolení stanoviště řízení letového provozu, koordinace řízení letového provozu a provozovatele letiště, povolení ÚCL v závislosti na tom, kde se bezpilotní prostředek v prostoru CTR, MCTR konkrétně nachází a zda jsou prováděny letecké práce).

Provoz bezpilotních prostředků není možný v zakázaných, nebezpečných



Okamžitá kontrola termogramu z termokamery pro okamžité vyhodnocení aktuálního stavu snímaného porostu

a jiným uživatelem aktivovaných omezených, rezervovaných a vyhrazených vzdušných prostorů (s výjimkou, kdy ÚCL povolí jinak). Dále nelze překročit ochranná pásma podél nadzemních dopravních staveb, inženýrských sítí, telekomunikačních sítí, uvnitř zvláště chráněných území, v okolí vodních zdrojů a objektů důležitých pro obranu státu (s výjimkou, kdy tak povolí ÚCL na základě předchozího souhlasu příslušného správního orgánu nebo oprávněné osoby).

Přeprava nebezpečných látek nebo zařízení (kromě provozních náplní) a shazování předmětů za letu (kromě leteckých veřejných vystoupení a součástí) nejsou povoleny.

Doplňek X také definuje horizontální minimální povolenou vzdálenost bezpilotního prostředku při vzletu a přistání od osob (kromě pilota) na 50 m, od osob, prostředků nebo staveb za letu na 100 m a přiblížení k hustě osídlenému prostoru za letu na 150 m (s výjimkou, kdy ÚCL povolí jinak).

Součástí Doplněk X je rozdělení bezpilotních letadel podle maximální vzletové hmotnosti a účelu použití (rekreační, výdělečné, experimentální, výzkumné). Jednotlivé kategorie se liší v tom, zda je povinná evidence letadla, pilota, přezkoušení žadatelů před vydáním povolení k létání, povolení k provozování leteckých prací a činností pro vlastní potřebu a označení ID štítkem. To vše je poté v působnosti ÚCL. Dále Doplněk X řeší povinnost a výši povinného pojištění.

V době zvyšujícího se zájmu o bezpilotní prostředky a vyvíjení nových

aplikací napříč širokým spektrem oborů jsou legislativní pravidla nutnosti pro bezpečný a bezproblémový letecký provoz.

Dva typy senzorů

Senzorovou techniku lze rozdělit do dvou kategorií na pasivní a aktivní senzory. Pasivní senzory zaznamenávají/měří přirozené záření odražené nebo emitované rostlinami. Aktivní senzory samy emitují záření a následně zaznamenávají/měří frakci odraženou od rostlin.

skutečnost pomocí přívícení měřené plochy pomocí vysoce svítivých diod. Druhou možností, vhodnou i pro bezpilotní prostředky, je měření intenzity dopadajícího světla. Pomocí tohoto doplňkového měření a kalibrace snímků předejdeme rozdílům v odrazivosti sledovaného prostředí. V některých případech lze rovněž využít kalibrační desky se známou reflektací, které umístíme do blízkosti zájmového území. Tyto desky se fotí souběžně se zájmovou plochou a slouží následně pro kalibraci snímku.

Optické senzory jsou blízké způsobu vnímání lidského oka. Fungují na principu záznamu/měření různého množství světla odraženého od povrchu ve specifických spektrálních pásmech (RGB). Optické senzory mohou mít různé množství pásem o specifické šířce. Podle počtu spektrálních pásem se rozlišují optické senzory na panchromatické (jedno široké pásmo, multispektrální (tři až deset pásem) a hyperspektrální (desítky až stovky úzkých spektrálních pásem).

Z uvedeného přehledu senzorů v tabulce 2 představují optické senzory pro výzkum a praktické použití vysoký potenciál. Vhodným výběrem senzoru, resp. vlnových délek, získáme

se projeví na poměru pohlcené a odražené energie. Především odrazivost červené složky se zvyšuje a výsledek je žloutnutí listů (kombinace zelené a červené).

Pokud se posouváme do oblasti blízkého infračerveného záření (near-IR, NIR), okolo vlnové délky 0,7 μm , začne u zdravé vegetace odrazivost výrazně narůstat. V rozsahu vlnových délek od 0,7 μm do 1,3 μm listy rostlin odrazí 40 až 50 % dopadající energie. Většina zbývající energie je propuštěna, protože v této oblasti je absorpce minimální (menší než 5 %). Odrazivost v tomto pásmu je dána především rozdílnou vnitřní strukturou listů. Protože struktura listů je mezi druhy rostlin velmi variabilní, měření odrazivosti v této oblasti nám často dovoluje rozlišit rostlinné druhy, i když ve viditelném spektru vypadají stejně. Rovněž se v blízkém infračerveném záření významně projeví stres rostlin.

Pokles v odrazivosti je pozorován v zónách vlnových délek 1,4, 1,9 a 2,7 μm , protože v těch je energie silně absorbována vodou v listech. S odvoláním na tuto skutečnost je uvedené pásmo nazýváno pásmo vodní absorpce. Vrchol odrazivosti se nachází v oblasti 1,6 μm a 2,2 μm . V celém pásmu, kro-



Scéna zachycená 3D skenerem z pozemního měření

Pasivní senzory

Pasivní senzory měří záření ve viditelném (0,4–0,7 μm) a infračerveném spektru (0,7–14 μm). Optické senzory jsou závislé na slunečním záření, z čehož vyplývají i omezení spojená s proměnlivostí atmosférických jevů (mlha, kouř). Rozdílné výsledky mohou přinést také časové rozestupy mezi snímkováním. Pozemní optické senzory dnes mají možnost řešit tuto

řadu informací o vlastnostech půdy. Tvar křivky odrazivosti energie je jedinečný pro sledovaný objekt, je však ovlivňován i jeho stavem nebo podmínkami. Pro křivky zdravé vegetace jsou typické vrcholky a sedla. Chlorofyl silně absorbuje záření v oblasti spektra od 0,45 μm do 0,67 μm (modrá a červená barva), ale zelenou barvu silně odráží. Pokud je vegetace stresována, obsah chlorofylu se snižuje. Tato skutečnost

mě délky 1,3 μm , listová odrazivost negativně koreluje s obsahem vody v listech.

Křivka odrazivosti půdy vykazuje mnohem méně výkyvů. Mezi faktory, které mají dopad na půdní odrazivost, patří vlhkost půdy, zrnitostní složení, drsnost povrchu, oxidy železa a organická hmota. Například vyšší vlhkost v půdě snižuje její odrazivost. Stejně jako u vegetace je tento jev nejvýraznější

v pásmu absorpce vody okolo 1,4, 1,9 a 2,7 μm . Vlhkost půdy úzce souvisí se zrnitostním složením. Hrubá písčité půdy je obvykle odvodněna a výsledkem je nižší vlhkost a relativně vysoká odrazivost. Jemná struktura bez přirozené drenáže bude mít nízkou odrazivost. Při absenci vody však bude půda samotná vykazovat opačné výsledky. Hrubší textura půdy se bude jevit tmavší než jemná textura. Další dva faktory, které redukuje odrazivost, jsou drsnost povrchu půdy a obsah organické hmoty.

Pro záznam infračerveného záření jsou v oblastech 8 až 14 μm používány termokamery, kterým věnujeme v tomto článku zvýšený prostor s ohledem na jejich používání v našich pokusech a prezentované příklady.

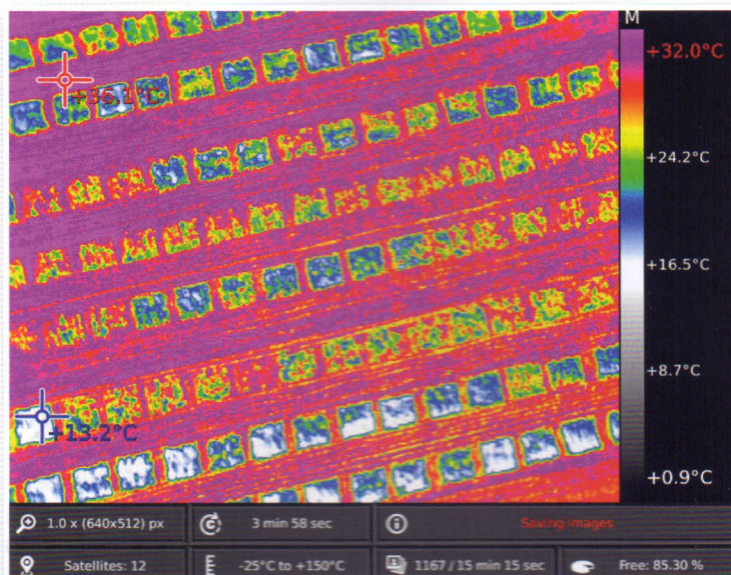
Aktivní senzory

Jako zajímavá a perspektivní oblast využití bezpilotních prostředků se ukazuje jejich nasazení při tvorbě modelů terénu. Vrstevnicové modely často nevyhovují speciálním aplikacím, kdy potřebujeme znát velice přesně reliéf zájmového území. Kromě představené spektroskopie se uplatňuje laserové měření povrchu Země známé pod jménem LIDAR. Obrázek na předchozí straně ukazuje scénu zachycenou 3D skenerem z pozemního měření. Ze signálu je vymodelován pohyb osob nebo překážky v okolí senzoru. Díky uvedenému měření můžeme kromě modelu terénu popisovat habitus rostlin a jejich zapojení.

Termální snímání a termokamery

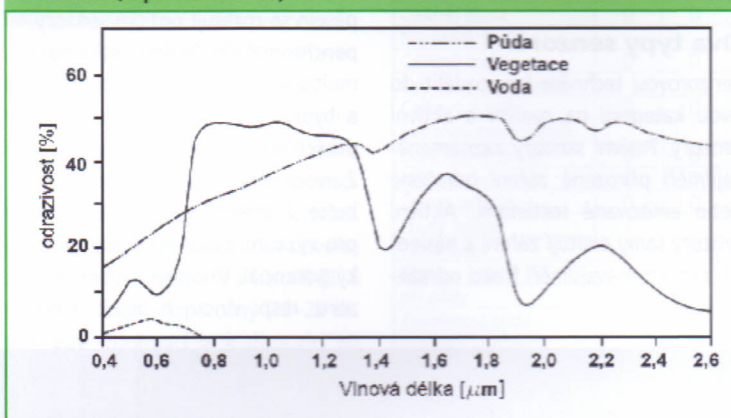
Termokamera jako měřicí přístroj znamená intenzitu tepelného záření vyzařovaného z povrchu měřených objektů. Na základě změřené intenzity vyzařování a zadaných parametrů je pak termokamera schopna výpočtem stanovit rozložení povrchové teploty. Výstupem z měření termokamerou je tzv. termogram (nesprávně též termovizní snímek, termosnímek apod.). To je obdoba fotografie, tj. digitálního snímku, kdy ale jednotlivé pixely nenesou informaci o naměřeném jas, nýbrž o povrchové teplotě snímaných objektů.

Pro bezdotykové měření teploty je důležitý poznatek, že intenzita vy-



Termogram ze snímání různých odrůd pšenice z jarního období, který ukazuje významné teplotní rozdíly spojené s mírou a kvalitou zapojení porostu

Typické křivky odrazivosti spektra vegetace, půdy a vody (Lillesand a kol. 2004, upravil Kroulík)



zařování z povrchu těles roste s jejich povrchovou teplotou, je však závislá na materiálových vlastnostech. Fyzikální zákony, které tuto skutečnost reflektují, jsou známy jako Stefanův-Boltzmannův zákon a Planckův vyzařovací zákon.

Skutečnost, že intenzita tepelného záření roste s povrchovou teplotou, je možné využít právě při bezdotykovém měření teploty. První skutečně použitelné přístroje, které toho byly schopny, byly zkonstruovány okolo roku 1900. Jednalo se o tzv. pyrometry, které byly schopny bezdotykově stanovit průměrnou povrchovou teplotu v určité (menší či větší) oblasti a našly využití především v hutnickém průmyslu.

Moderní termokamery využívají obrazové senzory a jsou schopny změřit povrchovou teplotu v 640 x 512 i více bodech. Tento údaj zároveň udává rozlišení výsledného termogramu.

Čím větší je rozlišení termogramu, tím větší prostorové rozlišení lze při měření povrchové teploty získat.

Z hlediska principu konstrukce jsou termokamery velmi podobné klasickým fotoaparátům. Tím hlavním rozdílem je optický senzor, resp. detektor (nejčastěji tzv. mikrobolometr nebo alternativně některý z kvantových detektorů jako např. InGaAs) a použitá optika, která musí být z materiálu propustného pro daný rozsah vlnových délek. Detektor infračerveného záření převádí dopadající tepelné záření na elektrický signál, který je digitalizován a pak dále zpracováván. Vedle optiky se jedná o nejdůležitější součást termokamery a jeho konstrukce a princip funkce podstatným způsobem ovlivňuje parametry termokamery.

Nejčastěji používané termokamery snímají tepelné záření ve vlnovém

pásmu přibližně 8 až 14 μm . Jako senzor záření je pak použit již zmiňovaný mikrobolometr a materiál, z něhož je konstruována optika, je germanium. Termokamery, které pracují v tomto vlnovém pásmu, se označují jako LWIR (Long Wave InfraRed). V rámci našich experimentů byla využita právě tato LWIR termokamera Workswell WIRIS.

Při měření teploty s pomocí termokamery je třeba vždy pamatovat na to, že termokamerou není přímo měřena (skutečná) absolutní teplota povrchu. Absolutní teplota může být termokamerou (a to více či méně přesně) výpočtem stanovena až po zadání tzv. parametrů měření, tj. emisivity (materiálová vlastnost), odražené zdánlivé teploty (vliv vyzařování okolních objektů), vzdálenosti, atmosférické vlhkosti a atmosférické teploty. Přičemž pro měření blízkých těles (ve vzdálenosti několika málo metrů) a nízké teploty atmosféry se vliv atmosféry uplatňuje poměrně málo a podstatné je především správné nastavení emisivity a zdánlivé odražené teploty.

Termokamery jsou mimořádně citlivá měřicí zařízení, kdy nejmodernějších modelů schopnost změřit nejmenší teplotní rozdíly dosahuje hodnot 0,03 $^{\circ}\text{C}$ – 0,015 $^{\circ}\text{C}$. *

Podpořeno projektem TRIO č. FV10213 (Ministerstvo průmyslu a obchodu).

Ing. Jan Lukáš, Ph.D.¹

Petr Lněnička,⁴

doc. Ing. Milan Kroulík, Ph.D.,²

Mgr. Jitka Kumhálová, Ph.D.,²

Ing. Jan Sova,³

RNDr. Mikuláš Madaras, Ph.D.,¹

Ing. Jan Haberle, CSc.,¹

Ing. Milan Urban, DiS,¹

Ing. Jiří Hermuth,¹

Ing. Zdeněk Nesvadba Ph.D.,¹

Ing. Michaela Friedlová,¹

Ing. Radek Pražan, Ph.D.,⁵

Ing. Jiří Souček, Ph.D.⁵

¹Výzkumný ústav rostlinné výroby,

v. v. i.

²Česká zemědělská univerzita,

³Workswell, s. r. o.,

⁴Vertical Images, s. r. o.

⁵Výzkumný ústav zemědělské

techniky, v. v. i.

Foto autofi