Metsa lehepinnaindeksi kaardistamine lennukilidari, satelliidipiltide ja maapealsete mõõtmiste abil Järvselja VALERI testalal

Ave Kodar[1*], Mait Lang[2,3], Tauri Arumäe[2], Alo Eenmäe[2], Jan Pisek[3] ja Tiit Nilson[3]

Kodar, A., Lang, M., Arumäe, T., Eenmäe, A., Pisek, J., Nilson, T. 2011. Leaf area index mapping with airborne lidar, satellite images and ground measurements in Järvselja VALERI test site. – Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused 55, 11–32. ISSN 1406-9954.

Abstract. The aim of this study was to compile the leaf area index (LAI) map of a 3×3 km VALERI test site in Järvselja, Estonia. Canopy transmittance measurements of LAI by LAI-2000 Plant Canopy Analyzers and digital cameras supplied with fisheye converters were carried out on 42 elementary sampling units at ground level and at breast height level. The vegetation LAI was estimated as a sum of the tree canopy true green LAI obtained from the inversion of canopy gap fraction data and of the ground vegetation effective LAI. Red channel from SPOT-4 HRV-IR image and airborne lidar data based canopy transmittance were used for up-scaling. The LAI map was compared with standard LAI products from Terra MODIS and ENVISAT MERIS. We found that lidar data based LAI estimate on up-scaled map saturated at high values (LAI > 4.5) compared to the LAI estimates based on SPOT-4 HRV-IR red channel. Validation of MODIS LAI product revealed substantial underestimates of LAI compared to the up-scaled field measurements and rather large random noise. ENVISAT MERIS LAI product was more similar to up-scaled field measurements; however, rather large unexpected random variations exist in its time series.

Key words: leaf area index, multispectral satellite images, airborne lidar, VALERI project.

Authors' addresses: [1]Faculty of Science and Technology, University of Tartu, Vanemuise 46, Tartu 51014, Estonia;
[2]Institute of Forestry and Rural Engineering, Estonian University of Life Sciences, Kreutzwaldi 5, Tartu 51014, Estonia;
[3]Tartu Observatory, 61602, Tõravere, Tartumaa, Estonia; [*]e-mail: ave_k@yahoo.com

Sissejuhatus

Maa biosfääri monitooring on kaasaegse satelliitkaugseire üks olulisemaid ülesandeid (Ustin, 2004). Mitmesuguste biosfääri parameetrite globaalne hindamine on eesmärgiks selliste skannersüsteemide nagu MODIS, MERIS, MISR, SEAWIFS, VEGETATION jt. programmides. Nii näiteks on MODISe poolt pidevalt toodetavate produktide hulgas mitmed taimkatet iseloomustavad suurused nagu lehepinnaindeks (LAI) ja neeldunud fotosünteetiliselt aktiivne kiirgus (fAPAR). Kuigi juba praegu saadakse satelliitmõõtmiste põhjal pidevalt lehepinnaindeksi kaarte, pole vastavate LAI produktide tegelikku kvaliteeti veel korralikult testitud.

Võimalus hinnata lehepinnaindeksit satelliitkaugseire meetoditega omab küll suurt globaalset ja ka riiklikku potentsiaali, kuid ilma vastavaid produkte põhjalikult

testimata ei saa eelnimetatud teel saadavate LAI hinnangute täpsuses kindel olla. Seetõttu on selliste produktide testimiseks organiseeritud rida rahvusvahelisi projekte, nende hulgas projekt VALERI (*Validation of Land European Remote sensing Instruments*, *http://www.avignon.inra.fr/valeri/*), mille peamiseks ülesandeks on testida keskmise ruumilise lahutusega kosmiliste skannerite abil toodetavate taimkatte karakteristikute (LAI, fAPAR, fCOVER (katvus)) hindamise algoritme (Kodar *et al*., 2008).

VALERI programmis osaleb 21 riigi seas ka Eesti. Eestit esindavaks organisatsiooniks on Tartu Observatoorium ja üks programmi maapealsetest testaladest asub Järvselja metsades. Testaladel tehakse samade muutujate, mille hinnanguid saadakse satelliitkaugseire meetoditega, maapealseid mõõtmisi. Peamisteks mõõtevahenditeks on taimkatte analüsaatorid LAI-2000 ja digitaalkaamerad, mis võimaldavad teha poolsfääri- ehk kalasilmapilte. Mõlemad seadmed mõõdavad taimkatte läbipaistvust ja selle olenevust vaatesuunast ning kuuluvad kaudsete mittekontaktsete lehepinnaindeksi mõõtmise meetodite ehk optiliste meetodite hulka.

LAI on dimensioonitu muutuja, mille täpne definitsioon oleneb selle mõõtmiseks kasutatavast tehnoloogiast. Antud töös on lehepinnaindeks defineeritud kui lehtede ühe poole pindala (pool kogupindalast) maapinna ühiku kohta (Watson, 1947; Chen & Black, 1992). On olemas ka teistsuguseid definitsioone, mis püüavad lisaks arvesse võtta lehtede või okaste kuju eripärasid. Erinevate definitsioonide tõttu on nende põhjal arvutatud LAI väärtused oluliselt erinevad.

Lehepinnaindeksi hindamiseks on sisuliselt kaks peamist meetodit – otsene või kaudne mõõtmismeetod. LAI hindamise otsene meetod tähendab, et lehepinda mõõdetakse erinevate kontaktsete meetoditega, milleks on nn. destruktiivne proovivõtt, mudelpuu meetod ja varisekastide meetod (Jonckheere *et al*., 2004). LAI hindamise otsene meetod ei ole suure töömahukuse ja vähese kasutusvõimaluse tõttu sobiv lehepinna arengu ruumilise ja ajalise dünaamilisuse pikaajalisel monitooringul (Chason *et al*., 1991). Küll on aga otsesed tehnoloogiad olulised kalibreerimismeetoditena, et kontrollida kaudseid meetodeid kasutades saadud tulemusi.

Kaudsete meetodite puhul tuletatakse LAI hinnangud ajaliselt, töökoormuselt ja tehnoloogiliselt lihtsamalt mõõdetavatest parameetritest (Fassnacht *et al*., 1994; Gower *et al*., 1999). LAI hindamiseks kasutatavad kaudsed meetodid saab omakorda jagada kolme gruppi.

Esimese grupi moodustavad kaudsed kontaktsed mõõtmismeetodid, nt. kaldnõel (Jonckheere *et al*., 2004) ja allomeetrilised meetodid. Allomeetrilise meetodi korral kasutatakse LAI määramiseks metsas seoseid puu summaarse lehepindala ja mingi suhteliselt kergemini määratava suuruse vahel (kas puu rinnasdiameeter, puutüve vett juhtiva osa ristlõikepindala või aastaringide juurdekasv). Puutüve juhtiva osa pindala määratakse kas tüvepuuri abil või (näiteks männil) mõõtes tüve diameetrit kõige vanema elusa männase juurest (seal on kogu tüvi vett juhtiv) ja lahutades sellest koore paksuse. Kahjuks pole elusa võra aluse tüve diameetri mõõtmine vanematel puudel kerge. Lisaks tuleb vastava regressiooniseose leidmiseks siiski teatud hulk mudelpuid langetada ja nende lehepindala või lehtede mass määrata (Nilson, 1994).

Teise grupi moodustavad kaudsed mittekontaktsed LAI mõõtmised ehk teisiti öeldes optilised meetodid. Optilised meetodid baseeruvad valguskiirguse taimestikku läbival osal (fAPAR=1 – taimestiku läbipaistvus). Instrumendid, mida vastavatel mõõtmistel kasutatakse, saame jagada kahte alagruppi (Jonckheere *et al*., 2004).

Esimese alagrupi seadmete abil mõõdetakse taimkatte läbipaistvust. Nendeks instrumentideks on DEMON (*CSIRO, Canberra, Australia*), päikeselaigu septomeeter (*Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA*), taimkatte analüsaator LAI-2000 (*LI-COR Biosciences, Nebraska*) ja mitmekanaliline

taimkatte kujutise formeerija MVI (Kucharik *et al.,* 1998).

Teise alagruppi kuuluvate instrumentidega kogutakse andmeid võrastikus olevate tühimike suurusjaotuse kohta. Nendeks vahenditeks on esiteks instrument TRAC (*3rd Wave Engineering, Ontario, Canada*), mis analüüsib võrastikus olevate aukude suurust ja selle kaudu võrastiku ehitust ning teiseks kalasilma– ehk poolsfääripilt (Evans & Coombe, 1959; Anderson, 1964), mida on kasutatud taimkatte ja ka metsade läbipaistvuse ning kiirgusvälja kirjeldamiseks juba aastaid.

Kalasilma- ehk poolsfääripilt on meetod taimkatte uurimiseks, kasutades ülilainurkobjektiiviga varustatud kaamerat, mille abil saadud kujutised võivad olla pildistatud suunaga seniidi poole (alt üles) või suunaga nadiiri poole (ülevalt alla). Ülilainurkobjektiiviga pildistamise tulemusena projekteeritakse kogu poolsfäär (180°) ringikujuliseks pildiks (Herbert, 1986; Frazer *et al.*, 1997). Kui eeldada, et kaamera optiline telg on pildistamise hetkel vertikaalne, siis seniidi (või vastavalt nadiiri) suund vastab ringikujulise pildi keskpunktile ja horisondi suund ringi välispiirile. Teaduslikel eesmärkidel kasutatavatel poolsfääriobjektiiviga digikaameratel tuleb enne välimõõtmisi laboris määrata kindlaks kujutise projektsioonifunktsioon ning kaamera ja objektiivi vinjeteerimisfunktsioon (Lang *et al.*, 2010), mille abil kõrvaldatakse kujutiselt geomeetrilised ja radiomeetrilised moonutused.

Kalasilmapiltidelt saadakse hinnangud, millise tõenäosusega on erinevates vaatesuundades näha taevast, ehk hinnatakse taimkatte läbipaistvust ja selle olenevust vaatesuunast. Praktiliselt tähendab see, et igas pildi punktis tuleb saada hinnang, kas selles punktis on näha taevas või mingi taimeosa (Rich, 1990). Uuemad pilditöötlusmeetodid (Lang *et al.*, 2010) võimaldavad objektiivselt arvestada ka niinimetatud segupiksleid, kus taeva ja taimeelementide katvuse suhe on pidev suurus vahemikus 0–1.

Tänapäeval töödeldakse kalasilmapilte digitaalsel kujul, selles töös kasutati programmi CAN-EYE (*https://www4.paca.inra.fr/can-eye*), mis baseerub värviliste kalasilmapiltide interaktiivsel klassifitseerimisel erinevateks objektideks vastavalt nende värvusele pildil. Pikslite puuvõrade või taeva klassi liigitamise reegli (diskrimineerimisnivoo) valib operaator selliste meetodite puhul subjektiivselt (Jonckheere *et al.*, 2005).

LAI hindamiseks kasutatavate kaudsete meetodite kolmanda grupi moodustavad maapealsetel mõõtmistel baseeruvad aero– ja satelliitkaugseire meetodid, millel on metsade LAI määramisel oluline tähtsus. Koos laserskanneerimise tehnika arenguga on hakatud kasutama ka lennukile paigutatud laserskannerite (lidarite) andmeid LAI kaardistamiseks (Korhonen *et al.*, 2011).

Satelliitkaugseire abil LAI hindamiseks on kasutusel mitmeid meetodeid. Enamusel juhtudel leitakse regressiooniseosed maapealsete meetoditega hinnatud LAI ja vastava prooviala heleduse vahel kas ühes või mitmes skanneri kanalis või siis multispektraalsete indeksitega (Ahern *et al.*, 1991; Brown *et al.*, 2000; Fernandes *et al.*, 2004; Stenberg *et al.*, 2004). Saadud regressiooniseoseid kasutatakse pikselhaaval LAI kaartide saamiseks.

Teine rühm meetodeid kasutab metsa heleduse mudeli pööramise tehnikat, kus mudeli sisendiks on vastava piksli heledused satelliidipildilt mõõdetuna. Kui uuritava ala kohta on olemas metsanduslik andmebaas, saab siin kasutada lisainformatsiooni metsa heleduse mudeli mõnede parameetrite väärtuste fikseerimiseks (Gemmel *et al.*, 2002). MODISe projekti LAI algoritmis kasutatakse metsa heleduse mudeli abil eelnevalt valmis arvutatud tabeleid (Knyazikhin *et al.*, 1998).

LAI maapealsete punkthinnangute laiendamiseks satelliidipildi abil suuremale territooriumile on kasutusel mitmesugused statistilised interpoleerimise ja

ekstrapoleerimise meetodid, näiteks *kriging* ja *cokriging* (Garrigues *et al.*, 2006). Eestis on multispetraalsete satelliidipiltide ja näidispuistute andmete järgi metsa struktuuriparameetrite kaartide loomiseks kasutatud edukalt õpetatavaid algoritme (Tamm & Remm, 2009).

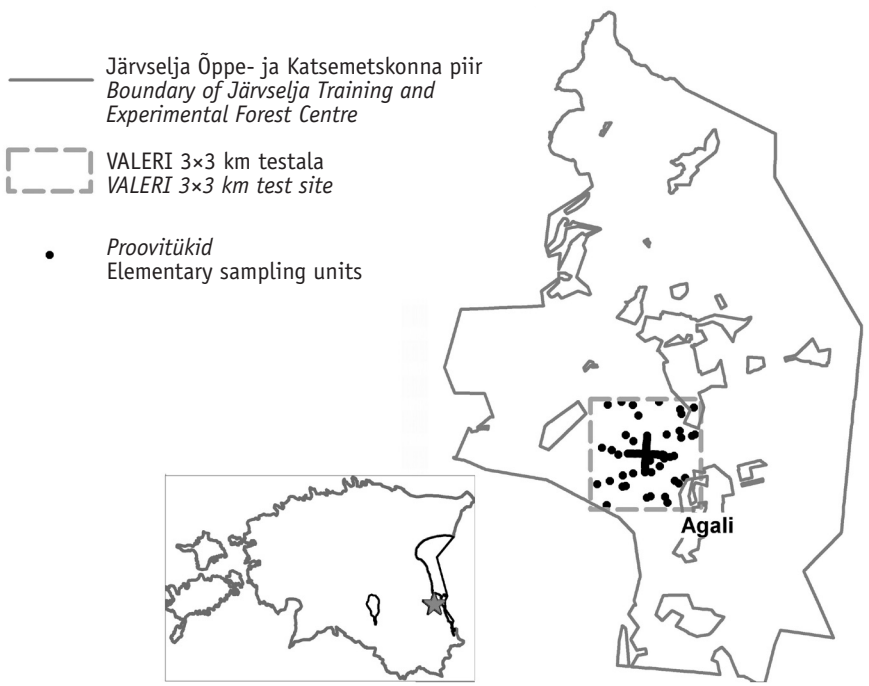
Käesoleva uuringu eesmärgiks oli koostada Järvselja Õppe- ja Katsemetskonnas asuva rahvusvahelise VALERI projekti testala kohta lehepinnaindeksi kaardid, kasutades selleks erinevaid sensoreid, ja võrrelda saadud kaarte LAI globaalsete standardproduktidega. Selleks tehti maapealsetel proovitükkidel metsas mõõtmisi taimkatte analüsaatorite ja poolsfäärikaameratega. Saadud taimkatte läbipaistvuse ja takseerandmete põhjal arvutati puurinde ning kogu taimkatte lehepinnaindeks. Seejärel kasutati satelliidi SPOT-4 skanneri HRV-IR pilti ja lennukilt kogutud lidarimõõtmisi ning koostati regressiooniseoste põhjal lehepinnaindeksi kaardid, mida võrreldi Terra MODISe LAI ja ENVISAT MERISe LAI standardproduktiga.

Metoodika

Testala

VALERI projekti Järvselja 3×3 km suurune testala asub Järvselja Õppe– ja Katsemetskonnas Agalist loodes. Testala keskpunkti geograafilised koordinaadid on 58°17′55.0824″N, 27°15′44.5824″E (joonis 1). Testalal on tavalised keskealised majandusmetsad, palju on segapuistuid. Puuliikidest domineerivad aru- ja sookask, harilik kuusk, harilik mänd ning sanglepp. Männikute puhul väärib märkimist noorte puistute puudumine (tabel 1).

Maapealsed proovitükid metsa struk-



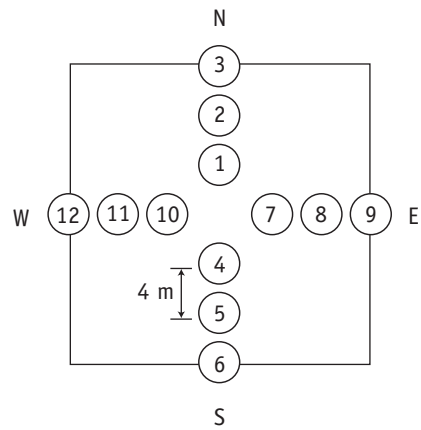
Joonis 1. VALERI 3×3 kilomeetrise testala ja maapealsete mõõtmiste asukohad Järvseljal. Ala keskel on proovitükk iga 50 m järel 500 m harudega ristil.

Figure 1. Location of the 3×3 km VALERI test site and elementary sampling units in Järvselja.

Tabel 1. Testala puistute keskmised takseertunnused 2001. aasta metsakorraldusandmete põhjal.
Table 1. Main tree species and land use over the test site according to inventory data from 2001.

Puuliik või maakategooria *Main species or land category*	Pindala (ha) *Area (ha)*	H_{100} (m) *Site index (m)*	Vanus *Age*	Täius *Relative density*
Betula pendula, pubescens	342,1	25,5	37,81	78,32
Picea abies	189,4	24,4	37,47	75,46
Pinus sylvestris	68,2	27,0	92,04	76,99
Alnus glutinosa	57,8	25,6	44,01	86,34
Teised / *Other*	15,1	24,9	27,5	68,5
Lage ala / *Open area*	107,9	0	0	0
Eramaa / *Private land*	119,5	–	–	–

tuuriparameetrite mõõtmiseks olid samad, mis 2000. aastal projektiga alustamisel rajati. Proovitükid paiknevad testala keskel asuval 500 meetri pikkuste harudega ristil iga 50 meetri järel ja metsaeraldistes (joonis 1). Risti kujuliselt mõõtmiskohtade paigutamine oli algselt vajalik VALERI metoodikas autokorrelatsiooni analüüsiks. Mõõtmiskohad olid ka testala piiresse jääval seitsmel metsa kasvukäigu uuringute proovitükil (Hordo *et al.*, 2006).



Joonis 2. Läbipaistvuse proovipunktide paiknemisskeem proovitükil, mille küljepikkus on 24 m.
Figure 2. Sampling schema for transmittance measurements on elementary sampling units.

Taimkatte läbipaistvuse mõõtmine ja lehepinnaindeksi arvutamine

Maapealsed taimkatte läbipaistvuse (T) mõõtmised toimusid 2009. aasta 28. juulist kuni 31. juulini. Kasutati kolme taimkatte analüsaatorit LAI-2000, millest üks oli Agalis lagedal valgustatuse mõõtmiseks ja kahega mõõdeti võrastikku läbinud valgust. Mõõtmiste käigus võrreldi taimkatte analüsaatorite omavahelist tundlikkust lagedal.

Taimkatte analüsaatori optika nurklahutus seniidi suunas on 15°, nende sensorid olid varjutatud 180° lisaekraani abil, et vältida operaatori mõju. Samaaegselt taimkatte analüsaatoritega olid metsas kasutusel digikaamera Nikon Coolpix 4500 poolsfäärikonverteriga Nikon FE-C8 ja Canon EOS 5D poolsfääriobjektiiviga Sigma 8 mm F3.5 EX DG. Kaamerakomplektid olid Tartu Observatooriumi radiomeetrialaboris kaliibritud.

Võrastiku läbipaistvuse mõõtmisi tehti 42 proovitükil. Mõõtmised tehti 4 m, 8 m ja 12 m kaugusel proovitükkide keskpunktist risti kujuliselt paigutatud proovipunktides (joonis 2). Igas proovipunktis mõõdeti taimkatte analüsaatoriga neli läbipaistvuse suundolenevuse lugemit, muutes iga uue lugemi võtmise eel sensori asukohta 0,5 m raadiuses punkti ümbruses. Kokku võeti analüsaatoriga ühel proovitükil nii maapinnalt kui ka rinnakõrguselt (1,3 m) 3×4×4=48 lugemit, millest iga proovitüki jaoks saadi puurinde läbipaistvus $T_{LAI2000B}$ ja kogu taimkatte läbipaistvus $T_{LAI2000G}$. Maapinna tasemelt mõõtmise eesmärk oli saada edaspidi alustaimestiku lehepinnaindeksi hinnang sõltumatult puurindest.

Digikaameraga tehti igal proovitükil igas proovipunktis üks pilt 1,3 m kõrguselt maapinnast, kokku seega 1×12=12 pilti

ühe proovitüki kohta. Kui korraga oli kasutusel kaks kaamerat, tegi kumbki kaamera 6 pilti (kattes selliselt kaks erinevat ilmakaare suunda), kahepeale katsid kaamerad terve proovitüki. Kaamerad olid kinnitatud statiividele ja nende objektiivi optiline telg seati loodi abil vertikaalseks. Mõõtmised tehti võimalikult hajusa valgustatuse tingimustes. Kaameraid kasutati manuaalmoodis või fikseeritud ava moodis. Seaded valiti nii, et oleks välditud nii piltide ala- kui ka ülevalgustatus. Salvestatud *jpeg* vormingus värviliste kujutiste suurus on 1600×1200 pikslit Nikon CoolPix 4500 ja 4368× 2912 pikslit Canon EOS 5D korral. Canon EOS 5D pildid salvestati lisaks tavapärasele pakitud ja mittelineaarse gammakorrektsiooniga *jpeg* vormingule ka toorandmetena (*raw data*), et säilitada hilisemaks kontrolliks (sarnaselt taimkatte analüsaatori mõõtmismetoodikaga) kujutisena pealelangeva kiirguse tugevuse ja salvestatud väärtuste lineaarseos.

Taimkatte analüsaatoritega kogutud andmetest arvutati igal proovitükil taimkatte läbipaistvused, eraldi rinnakõrgusel ja maapinnal, seadmega kaasas olnud programmiga FV2000. Poolsfääripildid töödeldi vabavaraga CAN-EYE, mille tööpõhimõtteks on pikslite klassifitseerimine värvuse järgi klassideks „taevas" ja „taimeelement", mis vastavad läbipaistvustele 1 ja 0. Programm võimaldab projektsioonimoonutuste korrektsiooni. Kui proovitükil oli kasutusel korraga kaks kaamerat, siis kummagi kaamera pildid klassifitseeriti eraldi komplektidena ruumilise lahutuse erinevuste tõttu. Vahetulemus salvestati kahendväärtuses rasterpiltidena, mille ruumiline lahutus ühtlustati IDRISI Andes mooduli *Resample* abil. Seejärel avati iga proovitüki kohta saadud ühtlustatud pildikomplekt (12 pilti) uuesti CAN-EYE programmiga ja arvutati läbipaistvused 2,5° seniitnurga vahemike kohta.

Nii taimkatte analüsaatori andmete töötlusprogramm FV2000 kui ka CAN-EYE arvutavad tulemuseks ka niinimetatud efektiivse lehepinnaindeksi – juhul kui vaatlused on tehtud vaid lehtedest koosnevas taimkattes (põlluviljad kuni kõrsumisfaasini). Metsas on tulemuseks veel üldisem efektiivne taimkatteindeks PAI_{eff}, mis on mõjutatud ka okstest ja tüvedest ning ei arvesta lehtede grupeerumisega võrsetesse ja võradesse (Nilson, 1999).

Iga proovitüki puurindele arvutati tegeliku rohelise lehepinnaindeksi hinnang LAI_{inv_trees} poolsfääripiltidelt saadud võrastiku läbipaistvuse T_{HI} järgi Nilson ja Kuusk (2004) teoreetilise mudeliga, mille inversiooni abil kõrvaldati okste, tüvede ja lehtede omavahelise varjutamise ning võrsetesse ja võradesse klasterdatuse mõjud.

Mudeli sisendiks on võrastiku läbipaistvuse nurkolenevus ja puurinde struktuuri kirjeldus, millest olulisima osa moodustavad takseertunnused. Lisaks on arvutusteks vaja esialgset lehepinnaindeksi hinnangut, puuvõra läbimõõtu ja võra pikkust, puistu liitust ning katvust ja puude paiknemist kirjeldava parameetri (c) hinnangut. Tulemust mõjutab veidi esialgse lehepinnaindeksi hinnang (Lang, 2006).

Takseerandmetena kasutati peamiselt 2010. aasta kirjeldusi (33 proovitüki jaoks) ja kasvukäigu proovitükkide (Hordo *et al.*, 2006) andmeid. 2008. aastaks uuenenud endistele lagedatele aladele rajati eraldi proovitükid. Esialgne lehepinnaindeksi hinnang LAI_{allom} saadi Marklundi (1988) allomeetriliste lehemassi mudelite abil, mis põhinevad puude rinnasdiameetril, kõrgusel ja võrapikkusel. Liituse L hinnang saadi puuvõra läbimõõdu mudeli ja puude arvu kaudu (Lang *et al.*, 2007: tabel 3, valem 14). Katvuse K hinnang arvutati poolsfääripiltidelt seniitnurga vahemikus 0–5° keskmisest läbipaistvusest $K = 1 - T_{0..5°}$. Puude jaotusparameetri hinnang saadi Nilson (1999) järgi $c = -\ln(1 - K)/L$. Juhul kui saadi $K > L$, siis võeti katvus võrdseks liitusega. Mitme puistu puhul ei olnud mudeli inversioon esialgse liituse ja katvuse järgi hinnatud puude jaotusparameetri väärtuste juures arvutuslikult võimalik. Sellisel juhul muudeti puude paigutust nii kaua regulaarsemaks kuni mudelarvutus õnnestus. Sama

reeglit võrdluseks kogu proovitükkide andmestikul rakendades selgus, et mida regulaarsem on puude paigutus mudeli sisendis, seda väiksem lehepinnaindeks saadakse tulemuseks.

Alustaimestiku efektiivse lehepinnaindeksi hinnang $LAI_{eff,AT}$ arvutati taimkatte analüsaatorite LAI-2000 andmete põhjal maapinnalähedase ja rinnakõrguse efektiivse lehepinnaindeksi vahena. Ühe metsas mõõtnud LAI-2000 seadme optika tehniliste probleemide tõttu ei saanud kasutada 30.–31. juulil sellega kogutud andmeid. $LAI_{eff,AT}$ jaoks oli mõõtmisandmeid seetõttu vaid 27 proovialal. Ülejäänutele arvutati alustaimestiku lehepinnaindeksi hinnang poolsfääripiltidelt saadud puurinde efektiivse lehepinnaindeksi LAI_{eff_HI} ja taimkatteanalüsaatori mõõtmistel põhineva $LAI_{eff,AT}$ lineaarseose abil. Mudeli koostamisel eeldati, et tihedama võrastiku alla jõuab vähem valgust ja alustaimestik on hõredam.

Kokkuvõttes saadi igal proovitükil lehepinnaindeksi hinnanguks poolsfääripiltidelt arvutatud läbipaistvusele tuginev puurinde tegeliku rohelise lehepinnaindeksi ning alustaimestiku efektiivse lehepinnaindeksi summa:

$$LAI_{Plot} = LAI_{inv_trees} + LAI_{eff,AT} \quad (1)$$

Lehepinnaindeksi kaardi koostamine SPOT-4 HRV-IR pildi järgi

Punktmõõtmiste info laiendamiseks kogu testalale ja sellest väljapoole kasutati SPOT-4 HRV-IR ülesvõtet 8. augustist 2009, mis telliti arhiivist töötlustasemega 1B (esmane radiomeetriline ja geomeetriline korrektsioon). Pilt pöörati Eesti põhikaardi koordinaatide süsteemi üheksa meetrise jääkveaga. Rastri ruumiliseks lahutuseks valiti 20 m. Atmosfäärikorrektsiooni ei tehtud, vaid kasutati atmosfäärivälised heledusi. Igale proovitükile arvutati pildilt 15 m raadiuses ringis, pikslite lõikeid kaaluna arvesse võttes, programmiga helex32 (Lang *et al.*, 2005) kõigis HRV-IR neljas kanalis – (roheline (*green*), punane (*red*), lähiinfrapunane (*nir*) ja lühilaineline infrapunane (*swir*)) – keskmine spektraalne heledus.

Hilisemal pilditöötlusel selgus, et lehepinnaindeksi väärtustega hästi seotud HRV-IR *swir* kanalis oli pildiväljal skanneri detektorite erinevast tundlikkusest tingitud müra (hästinähtavad satelliidi orbiidi suunas kulgevad triibud Peipsi järvel, kus signaal erines naaberpikslites 10–20%), mis lisas selles kanalis proovitükkidele mõõdetud heledusele olulise juhusliku komponendi. Igale proovitükile arvutati taimkatte lehepinnaindeksi LAI_{Plot} regressioonimudelite koostamiseks normeeritud vegetatsiooniindeks *NDVI*, infrapuna suhte indeks *ISR* ja korrigeeritud lihtne suhteindeks *RSR*:

$$NDVI = (nir - red)/(nir + red), \quad (2)$$

$$ISR = nir / swir, \quad (3)$$

$$RSR = nir / red(1 - (swir - MIN(swir)/(MAX(swir) - MIN(swir))), \quad (4)$$

kus *MIN* on vähima väärtuse valik ja *MAX* on suurima väärtuse valik.

Lehepinnaindeksi kaardi koostamine lennukilidari andmete järgi

Lidariandmed on kolmemõõtmeline punktiparv, mis kirjeldab impulsi peegeldumisi objektidelt. Diskreetne peegeldumine eraldatakse sensori suunas hajunud signaalist selle tugevusele seatud läve järgi (Heritage & Large, 2009). Täpsem algoritm on firmade kommertssaladus.

Lidariandmetena kasutati Järvselja metsakorralduse tarbeks 29. juunil, 2010. a. Maameti topograafilise lidariga ALS50-II kogutud andmeid. ALS50-II on infrapunalidar, mis töötab lähiinfrapunases spektripiirkonnas lainepikkusel 1064 nm, läbides hästi rohelisi lehti (Liang, 2004) ja sobides seega hästi maapinna kõrgusmudeli koostamiseks. ALS50-II registreerib ühe väljasaadetud impulsi kohta kuni neli peegeldust. Impulsi läbimõõt taimkatte kohal

oli 0,54 m, vaatesuuna nadiirnurk ulatus kuni 29 kraadini, skanniriba laius maapinnal oli ca 1,2 km. Enamikel proovitükkidel oli keskmiselt 0,32–0,46 esimest peegeldust ruutmeetrile, seitsmel skanniribade ülekattealal asuval proovitükil oli 0,75–3,05 esimest peegeldust ruutmeetrile.

Teadaolevalt on Maa-ameti tavapärastel lendudel sisse lülitatud vastuvõtu tundlikkuse automaatkontroll (*Automatic Gain Control*, AGC), mis kindlustab kaardistustöödeks vajalike maapinnapeegelduste olemasolu ja väldib vastuvõtul detektori ületäitumist (Vain *et al*., 2009), aga samas muudab üsna keeruliseks registreeritud signaali tugevuse kasutamise metsanduslike tunnuste analüüsiks. Pole teada, kuidas mõjutab AGC peegelduste arvu jagunemist taimkattes kõrguse järgi. Samas arvutatakse just taimkattelt ja maapinnalt registreeritud peegelduste arvu suhte järgi katvuse ja sealt edasi läbipaistvuse ning lehepinnaindeksi hinnang.

Lidariandmete töötluseks kasutati vabavara FUSION (McGaughey, 2010). Kogu metskonna ala katvatest failidest lõigati välja VALERI testala ja proovitükkide „punktipilved" mooduliga *ClipData*. Eraldati maapinnalt tekkinud peegeldused (*GroundFilter*) ja koostati neljameetrise ruumilise lahutusega digitaalne maapinna kõrgusmudel (*CreateDTM*).

Seejärel arvutati SPOT-4 HRV-IR pildiga sarnasele 20 m ruumilise lahutusega rasterkihile peegelduste arvud maapinnalt ning 0,1 m ja 1,3 m kõrguselt maapinnast (*GridMetrics*). Tulemused teisendati IDRISI Taiga vormingus rasterpiltideks. Siis arvutati katvuste hinnangud kogu taimkattele kõikide peegelduste alusel ($T_{Lidar_0,1_PK}$) ja puurindele kõikide ($T_{Lidar_1,3_PK}$) ning ainult esimeste peegelduste ($T_{Lidar_1,3_P1}$) järgi:

$$T_{Lidar_0,1_PK} = 1 - \sum(P|h_p > 0{,}1)/\sum P, \quad (5)$$

$$T_{Lidar_1,3_PK} = 1 - \sum(P|h_p > 1{,}3)/\sum P, \quad (6)$$

$$T_{Lidar_1,3_P1} = 1 - \sum(P_1|h_p > 1{,}3)/\sum P, \quad (7)$$

kus h_p on peegelduse kõrgus maapinnast.

Puurinde läbipaistvuse hinnangut võrreldi poolsfääripiltidelt lidari vaatesuunas arvutatud läbipaistvusega. Lehepinnaindeksi ja lidariandmetest saadud läbipaistvuse seost lähendati mittelineaarse regressiooni abil Korhonen *et al*. (2011) töös toodud mudeliga

$$LAI = \beta(-\ln(T_{Lidar})). \quad (8)$$

Nii saadi mudelid taimkatte lehepinnaindeksile $LAI_{LCI,Plot} = f(T_{Lidar_0,1_PK})$ ning puurinde lehepinnaindeksile $LAI_{LCI} = f(T_{Lidar_1,3_PK})$ ja $LAI_{FCI} = f(T_{Lidar_1,3_P1})$.

Lehepinnaindeksi kaartide koostamine ja võrdlus

SPOT-4 HRV-IR teise kanali heledused ja *ISR* indeks teisendati kogu taimkatte lehepinnaindeksi hinnanguks LAI_{Plot} ning saadi $LAI_{HRV-IR2}$ ja LAI_{ISR} kaardid. Lidariandmetest arvutati kõikidel peegeldustel põhineva mudeliga (6) puurinde lehepinnaindeksi hinnang LAI_{LCI}. Tulemuste võrdlemiseks klassifitseeriti SPOT-4 HRV-IR pildil põhinevad LAI hinnangud võrdsete vahemikena 64 klassiks ja iga klassi pikslite kohta arvutati keskmine LAI_{LCI}.

SPOT-4 HRV-IR ja lidari andmete põhjal saadud lehepinnaindeksi kaarte võrreldi Terra MODISe LAI kaardiga (MOD15A2, ver. 005) ja ENVISAT MERISe LAI kaardiga. Suurema ruumilise lahutusega kaardid pöörati eraldi MODISe produkti sinusoidaalsesse projektsiooni ja MERISe LAI produkti Lambert'i õigepindsesse projektsiooni, et vähendada geokorrektsioonist tulenevaid vigu.

MODISe produkt MOD15A2 on ühekilomeetrise ruumilise lahutusega ja koosneb kaheksa päevase perioodi keskmisest tegeliku rohelise lehepinnaindeksi hinnangust, standardhälbest ning kvaliteedikontrolli andmetest. Kuna SPOT-4 HRV-IR ja lidari mõõtmisajale täpselt vastavat MODISe produkti pilvisuse tõttu ei olnud, siis võeti võrdluseks 6.–13. septembri,

2009. a. ja 10.–17. juuni, 2010. a. produktid. 2010. aasta MODISe LAI kaardi kohta oli VALERI testalal paljudel pikslitel kontrollkihis pilvede mõju märkus. LAI hinnangu standardhälve oli arvutatud vaid osadele pikslitele ja jäi vahemikku 1,2–1,6. Testalal olid maakatteklassideks MODISe klassifikatsiooni kohaselt (MOD12Q1, ver. 004) leht- või okaspuumetsad. SPOT-4 HRV-IR ja lidari lahepinnaindeksi kaartidelt arvutati keskmine väärtus üheksale MODISe 1×1 km pikslile VALERI testalal.

ENVISAT MERISe LAI kaarti toodetakse GEOLAND2 projekti raames alates 2011. aasta algusest. MERISe LAI kaart on 300 m ruumilise lahutusega ja sisaldab kümne päeva keskmist rohelise efektiivse lehepinnaindeksi hinnangut (Poilvé, 2011; GEOLAND, 2011) ning veakontrolli kihti. Vaatluse alla võeti ajavahemiku 11.06.2011–21.07.2011 MERISe LAI kaardid, mida võrreldi omavahel. MERISe LAI 21.07.2011 kaarti võrreldi 2009. aasta SPOT-4 HRV-IR2 ning ISR indeksi alusel koostatud LAI kaardiga ja 2010. aasta lidariandmete põhjal saadud LAI_{LCI} kaardiga. Järvselja VALERI testalal ei ole toimunud suuri häiringuid, seetõttu ei oma kuni kaheaastane ajavahe olulist mõju võrdlusele. Testalale jäi 87 MERISe pikslit, veakontrolli kihis ei olnud ühegi märkust.

Hinnangute kooskõla ja regressioonimudelite headus

Seoste ja mudelite headust hinnati determinatsioonikordaja R^2 alusel. Sama tunnuse kahel erineval viisil saadud hinnangu y_i ja x_i omavaheliseks võrdlemiseks arvutati keskmine ruuthälve *RMSE*

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2/(n-1)}\,. \qquad (9)$$

Vaatluste põhjal lähendatud mudelitele arvutati jääkhälve *RSE*

$$RSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \hat{y}_i)^2/(n-2)}\,, \qquad (10)$$

kus $\hat{y}_i$ on mudeliga vaatlusele i ennustatud väärtus ja n on vaatluste arv.

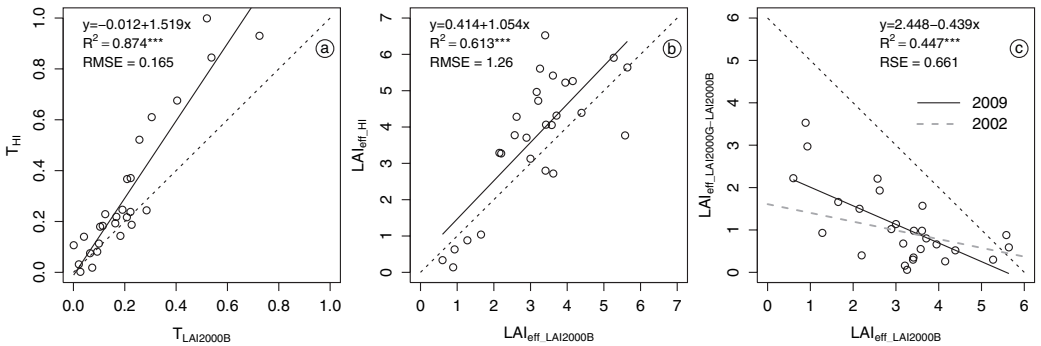
Tulemused

Taimkatte lehepinnaindeksi hinnangud

Poolsfääripiltidelt ja LAI-2000 seniidilähedase sektori (nurk 0,0–7,5°) andmetest arvutatud läbipaistvuste sobivus oli kuni läbipaistvuseni T = 0,4 üldiselt hea. Suuremate läbipaistvuste juures oli T_{HI} süstemaatiliselt suurem kui $T_{LAI2000B}$ (joonis 3a). Erinevuse üheks põhjuseks tuleb pidada valgustatuse trendi mõju $T_{LAI2000B}$ väärtustele, sest ka praktiliselt lagedatel aladel oli $T_{LAI2000B}$ oluliselt väiksem kui 1,0. Mõlema meetodi vead avalduvad efektiivse lehepinnaindeksi hinnangutes siiski märgatavalt tugevamini väikeste läbipaistvuste juures eelkõige seose logaritmilisuse tõttu (joonis 3b). Hoolimata suhteliselt suurest hajuvusest (*RMSE* = 1,26), oli puurinde lehepinnaindeksi efektiivväärtuste lineaarseos oluline, seos tugev (R^2 = 0,613) ja poolsfääripiltidelt saadav hinnang keskmiselt veidi suurem.

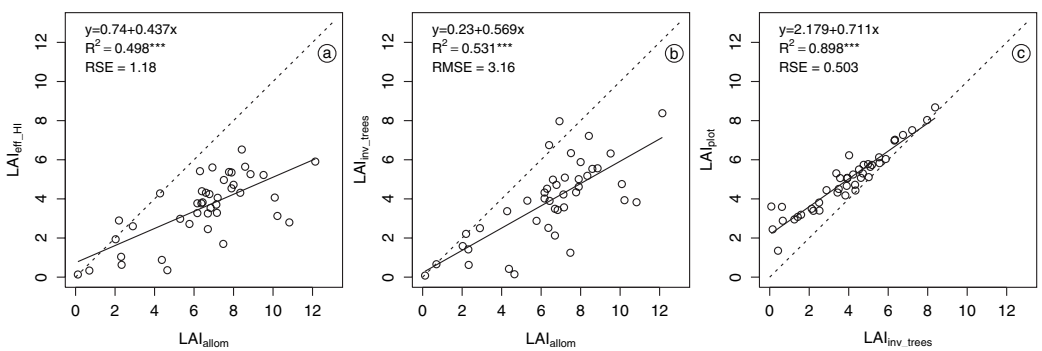
Alustaimestiku efektiivse LAI hindamiseks lähendatud lineaarmudel puurinde efektiivse LAI järgi oli oluline determinatsioonikordajaga R^2 = 0,447 (RSE = 0,66). Ilma puurindeta aladel on mudeli kohaselt alustaimestiku efektiivne lehepinnaindeks 2,4 (joonis 3c). Mudel sarnaneb 2002. aastal VALERI Järvselja testala andmetest saadud puurinde ja alustaimestiku lehepinnaindeksi seose mudeliga.

Puurinde tegelik roheline lehepinnaindeks arvutati Nilson ja Kuusk (2004) metoodikat kasutades puurinde läbipaistvuse nurkolenevuse põhjal, mis saadi poolsfääripiltidelt klassifitseerimistehnika abil programmiga CAN-EYE. Allomeetriliste lehemassimudelite kaudu saadud lehepinnaindeksist olid väiksemad nii LAI_{eff_HI} (joonis 4a), mis on eeldatav, kui ka LAI_{inv_trees} (joonis 4b). Ideaaljuhul, kui allomeetrilised mudelid ennustavad lehemassi täpselt ning lehemassi pindalaks teisendamisel ja läbipaistvuse mudeli pööramise prot-



Joonis 3. Poolsfääripiltidelt ja taimkatte analüsaatori andmetest arvutatud puurinde läbipaistvuste seos (a), efektiivse LAI võrdlus (b) ja alustaimestiku ning puurinde efektiivse LAI seos (c). Võrdlusena on toodud 2002. aastal Järvselja testalal tehtud mõõtmistest saadud mudel $LAI_{eff,AT,2002} = -0{,}2064 LAI_{eff,trees} + 1{,}6092$.

Figure 3. Comparison of tree canopy transmittance (a) and effective LAI (b) calculated from hemispherical images and LAI-2000. Relationship between tree canopy effective LAI and ground vegetation LAI (c) in year 2009 is similar to the 2002 year model $LAI_{eff,AT,2002} = -0{,}2064 LAI_{eff,trees} + 1{,}6092$.



Joonis 4. Puurinde allomeetrilise lehepinnaindeksi LAI_{allom} seosed poolsfääripiltidelt arvutatud efektiivse lehepinnaindeksiga LAI_{eff_HI} (a) ja võrastiku läbipaistvuse mudeli inversioonist saadud lehepinnaindeksiga LAI_{inv_trees} (b). Ideaaljuhul peaks kehtima $LAI_{allom} \approx LAI_{inv_trees}$. Alustaimestiku lehepinnaindeks on suurem läbipaistvama võrastiku korral (c).

Figure 4. Relationship between tree canopy allometric leaf area index LAI_{allom} *with* LAI_{eff_HI} *from hemispherical images (a) and with leaf area index* LAI_{inv_trees} *from gap fraction model inversion (b). In an ideal case one would have* $LAI_{allom} \approx LAI_{inv_trees}$. *Ground vegetation LAI is bigger in sparser stands (c).*

seduuris vigu ei ole, peaks kehtima seos $LAI_{allom} \approx LAI_{inv_trees}$. Võimalik, et mudelist saadud LAI_{inv_trees} on alla hinnatud puistutes, mille jaoks tuli inversiooniprotseduuri õnnestumiseks esialgse liitusel ja katvusel põhineva puude paiknemise jaotuse asemel valida regulaarsem jaotus, mis annab väiksema LAI_{inv_trees} sama läbipaistvuse korral. Kogu taimkatte lehepinnaindeksi hinnang LAI_{Plot}, mis saadi alustaimestiku efektiivse lehepinnaindeksi ja puurinde lehepinnaindeksi summana (1), suurenes

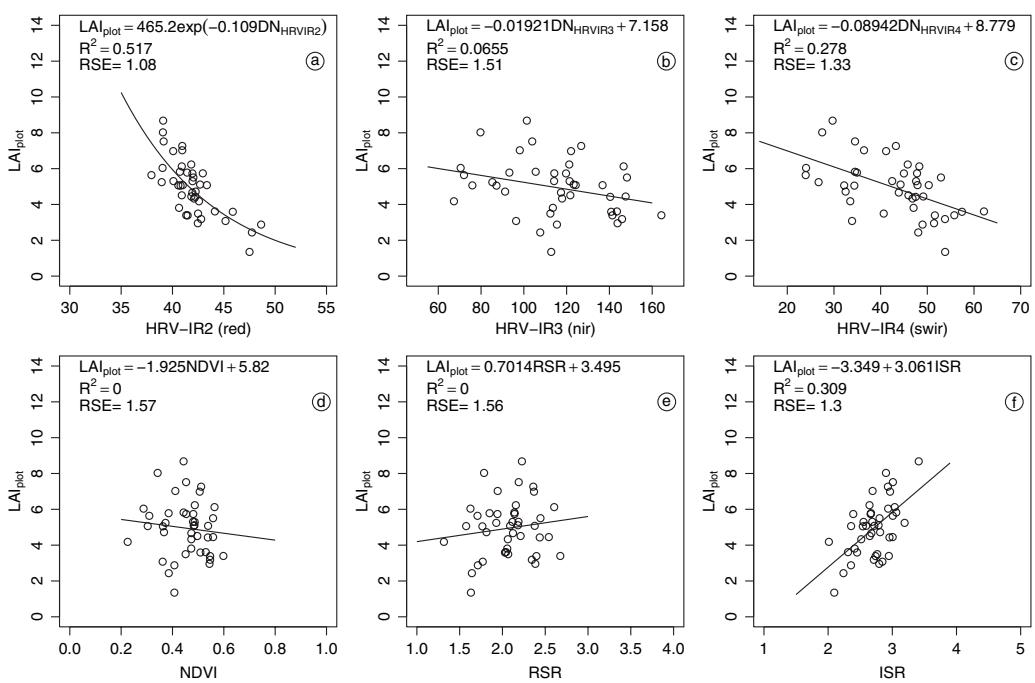
kokkuvõttes rohkem hõredamates puistutes (joonis 4c).

Taimkatte lehepinnaindeksi regressioonimudelid multispektraalsete heleduste ja indeksitega

Kõige parem mudel taimkatte lehepinnaindeksi ennustamiseks saadi SPOT-4 HRV-IR punase kanali heleduste järgi (R^2 = 0,517; *RSE* = 1,08) (joonis 5a). Lehepinnaindeksi ja lähiinfrapunaste kanalite heleduste seosed olid determinatsioonikordajat ja mudeli jääkhälvet arvestades oluliselt kehvemad. Keskmise lähiinfrapunase kanali (HRV-IR4) heleduse ja lehepinnaindeksi seose hajuvust suurendas pildilt avastatud detektorite tundlikkuse probleemidest tingitud müra (joonis 5c). Maailmas väga palju kasutatava *NDVI* indeksi ja lehepinnaindeksi vahel seos puudus (joonis 5d). Samuti puudus seos *RSR* indeksi ja lehepinnaindeksi hinnangute vahel (joonis 5e), kuigi *RSR* indeksit peetakse just boreonemoraalsete puistute erinevusi hästi arvestavaks tunnuseks multispektraalsetelt satelliidipiltidelt lehepinnaindeksi hindamisel (Stenberg *et al.*, 2004). Kasutatavaks osutus siiski lähiinfrapunastel kanalitel põhinev *ISR* indeks (R^2 = 0,309; *RSE* = 1,3) (joonis 5f).

Lehepinnaindeksi ja lidariandmetest arvutatud katvuse regressioonimudelid

Kogu taimkatte läbipaistvuse $T_{LAI2000G}$ ja kõiki peegeldusi arvestava $T_{Lidar_0,1_PK}$ vahel oli seos nõrk, R^2 = 0,198 (joonis 6a). Sel põhjusel ei saanud usaldusväärseks pidada maapinnalähedase läbipaistvuse $T_{Lidar_0,1_PK}$



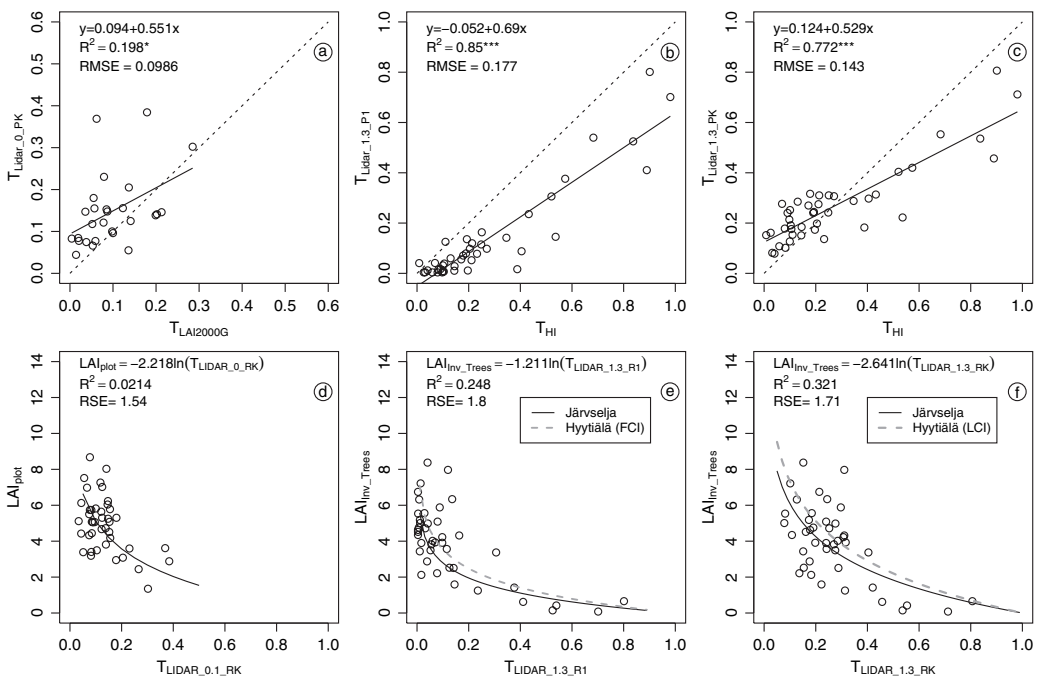
Joonis 5. SPOT-5 HRV-IR multispektraalselt pildilt arvutatud heledustel ja indeksitel põhinevad LAI_{Plot} mudelid. Lehepinnaindeksil puudub seos *NDVI* indeksiga (d), mida palju kasutatakse palja maapinna ja rohelise taimkatte eristamiseks, ja *RSR* indeksiga (e).

Figure 5. Models between SPOT-4 HRV-IR radiance and calculated multispectral and LAI_{Plot}. NDVI and RSR are not usable as LAI predictors (d, e).

ja kogu taimkatte lehepinnaindeksi LAI_{Plot} seose mudelit (joonis 6d). Hajuvuse põhjused on seotud proovitüki asukohavigadega, alustaimestiku tiheduse suure varieeruvusega, LAI-2000 mõõtmismetoodiliste probleemidega, maapinna kõrgusmudeli vigadega ja peegelduste registreerimise automaatmetoodikaga.

Puurinde läbipaistvuse hinnangud sõltusid kasutatud peegeldusjärkudest (joonised 6b, 6c). Maapeal Cajanuse toruga saadud T hinnangule (Rautiainen *et al.*, 2005) oleks põhimõttelt kõige lähedasem esimestel peegeldustel põhinev läbipaistvuse hinnang. Poolsfääripiltidelt saadud puurinde läbipaistvuse hinnang oli veidi suurem kui esimestel peegeldustel põhinev läbipaistvus $T_{Lidar_1,3_P1}$.

Selgus ka, et paljudes puistutes olid kõik esimesed peegeldused tekkinud kõrgemalt kui 1,3 m ja $T_{Lidar_1,3_P1} = 0$ (joonis 6b). Kõikidel peegeldustel põhinev katvuse hinnang on varasemate uuringute järgi süstemaatiliselt madalam kui esimestel peegeldustel põhinev (Morsdorf *et al.*, 2006; Hopkinson ja Chasmer, 2009; Lang, 2010; Korhonen *et al.*, 2011). Sama seaduspära kehtis ka käesoleva andmestiku puhul. Kõikidel peegeldustel tuginev läbipaistvuse hinnang ei küllastunud väikeste väärtuste juures ja sobis keskmise ruutvea järgi oluliselt paremini poolsfääripiltidelt saadud hinnangutega (joonis 6c). Üks võimalikest taolise erinevuse põhjustest on lidari ajamõõtmisintervall (Baltsavias, 1999), mis ALS50-II on 4 või 9 nanosekundit ehk valguse kiirust arvestades jääb jagunenud impulsi kahe registreeritava pee-



Joonis 6. Taimkatte (a) ja puurinde (b, c) läbipaistvuse seos lidarilt hinnatuga. LAI ja lidarilt saadud läbipaistvuse seosed (d, e, f). Puurinde lehepinnaindeksi joonistel (e, f) on võrdluseks Hyytiälä mudel (Korhonen *et al.*, 2011).

Figure 6. Relationships between canopy transmittance from lidar with the transmittance from LAI-2000 ground level measurements (a), transmittance from hemispherical images (b, c) and LAI (e, f). Hyytiälä model (Korhonen et al., 2011) is plotted for comparison on the LAI_{trees_inv} *subfigures.*

gelduse vahele alati 1,2 või 2,7 meetrine vahe. Seega, kui esimene peegeldus registreeritakse vähem kui 2,7 meetri kõrgusel katvuse arvutamiseks võetud virtuaalsest maapinnast (siin 1,3 m), siis teine peegeldus tekiks juba virtuaalse maapinna alla.

Puurinde lehepinnaindeksi LAI_{trees_inv} ennustamiseks ei saanud kasutada esimestel peegeldustel põhinevat läbipaistvust $T_{Lidar_1,3_P1}$, mis küllastus paljudes puistutes (joonised 6b, 6e). Siiski võrreldi Järvseljal saadud mudelit Korhonen *et al*. (2011) avaldatud efektiivse LAI mudeliga ja selgus, et Hyytiälä ja Koli metsade mudel annab võrreldes Järvselja mudeliga mõningase ülehinnangu. Mudel sobis Soomes, kus puistud on hõredamad kui Järvseljal ja lidari esimeste peegelduste maapinnalt tekkimise suurema tõenäosuse tõttu läbipaistvuse hinnang ei küllastu.

Järvselja puistutes sobis kasutamiseks kõikidel peegeldustel põhineva läbipaistvuse $T_{Lidar_1,3_PK}$ järgi saadud LAI mudel (joonis 6f), mille lähend annab vaid veidi väiksema hinnangu kui Korhonen *et al*. (2011) mudel. Siingi tuleb arvestada mõlema uuringu erinevaid lehepinnaindeksi arvutusmeetodeid ja siin arvutatud läbipaistvuse ning Korhonen *et al*. (2011) läbipaistvuse arvutuseeskirjades on ka erinevusi. Korhonen *et al*. (2011) kasutavad nimelt vaid impulsi esimest ja viimast peegeldust, aga Järvselja mudelis (6) olid arvesse võetud kõik neli võimalikku peegeldust. Peegelduste kaasamisest tekkivad erinevused on siin siiski arvatavasti üsna väikesed, sest proovitükkidel oli kolme ja nelja peegeldusega impulsse vastavalt 5,1% ja 0,4%.

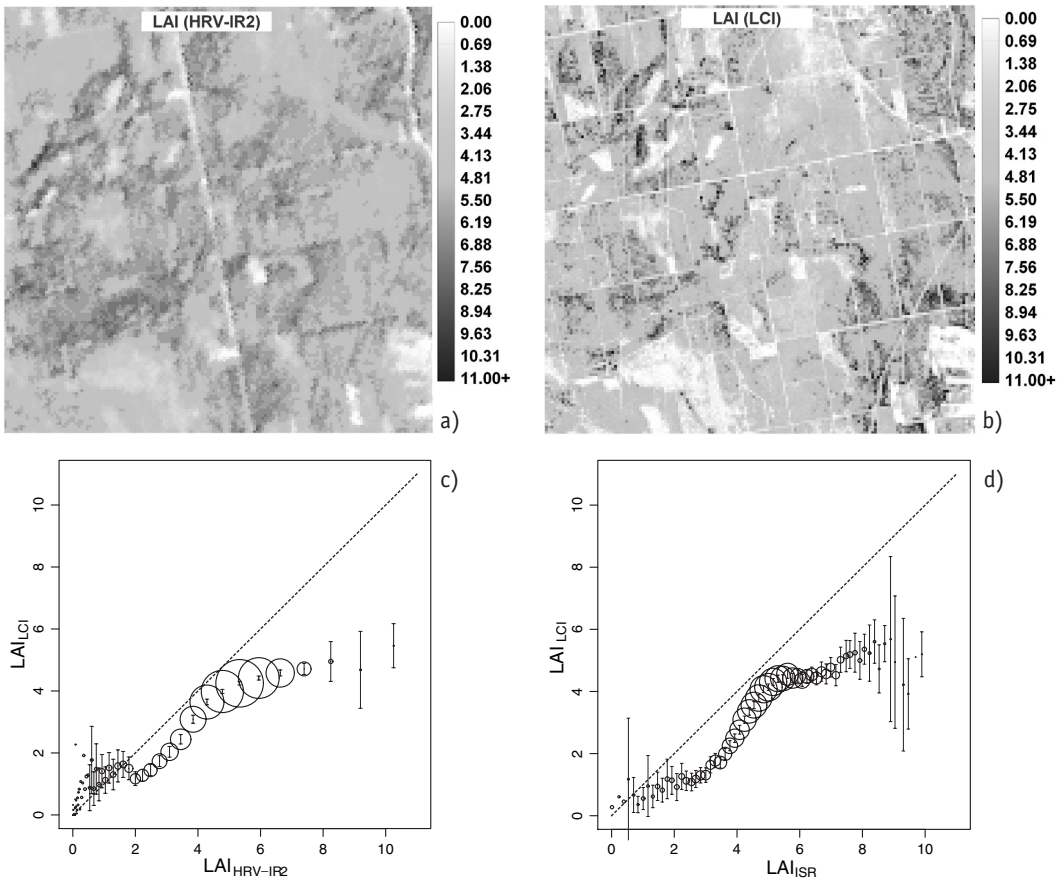
Lehepinnaindeksi kaartide võrdlus

Kuna SPOT-4 HRV-IR pildi põhjal saadi lehepinnaindeksi hinnang kogu taimkattele (joonis 7a) ja lidariandmetest vaid puurindele (joonis 7b), siis peaks vastavalt LAI_{LCI} arvutuseeskirjale olema lidarilt saadud hinnang null kuni selleni, mil taimede kõrgus hakkab ületama 1,3 meetrit. Sellest kõrgema taimkatte korral peaks lidarilt saadud lehepinnaindeksi hinnang hakkama asümptootiliselt lähenema SPOT-4 HRV-IR pildilt saadud lehepinnaindeksi hinnangule.

Kirjeldatud eeldatav seaduspära leidis üldiselt kinnitust VALERI testala andmetel (joonised 7c, 7d), kuid lidarilt saadud puurinde LAI hinnangutes ilmnes siiski teatud küllastumine multispektraalselt pildilt hinnatud LAI suhtes alates LAI_{LCI} = 4,5. Kuna sellisel puurinde lehepinnaindeksi tasemel on alustaimestiku osakaal kogu lehepinnaindeksis väike (joonis 4c), siis peaks multispektraalselt pildilt ja lidarilt arvutatud hinnangud suurematel LAI väärtustel olema pigem lähedased. Mõneti võib sellist küllastuvat seost seletada majandusmetsades raietega, sest lidarimõõtmised olid tehtud satelliidipildist aasta hiljem. Enne raiet tehtud satelliidipildi järgi oleks LAI suurem hilisemast lidarile tuginevast hinnangust, kuid raiete pindala on testalal suhteliselt väike.

MODISe LAI 2009. aasta 6. septembri ja 2010. aasta 10. juuni kaartidelt testalale jääva üheksa piksli väärtuste võrdlemisel selgus, et kahel pikslil on 2009. aastal 2010. aastaga võrreldes LAI umbes neli korda väiksem (joonis 8a) ja pikslite kaupa LAI hinnangute hajuvus on kahe aasta vahel üldiselt suur. Põhjuseks on arvatavasti 2010. aasta piltidel olevad pilved, mida MODISe LAI algoritm ei ole suutnud piisavalt hästi arvestada, kuigi veakontrolli kihis olid sellekohased märkused. Samuti mõjuvad LAI hinnangutele skanneri MODIS tehnilistest iseärasustest tulenevad kiirgusmõõtmiste tulemuseks saadava rasterpildi pikslite omavahelise kattuvuse probleemid (Tan *et al*., 2006) ning maakatteklassi võimalik valesti määramine LAI produkti algoritmis. Kahe aasta MODISe LAI keskmised kogu testala kohta siiski kattusid, aga jäid süstemaatiliselt madalamaks maapealsete mõõtmiste alusel saadud $LAI_{HRV-IR2}$ ja LAI_{ISR} keskväärtustest ning olid sarnased pigem puurinde LAI hinnangu LAI_{LCI} keskväärtusega (joonised 8b, 8c; tabel 2).

ENVISAT MERISe LAI kaartidelt eeldati juunist juulini stabiilset või veidi kasva-

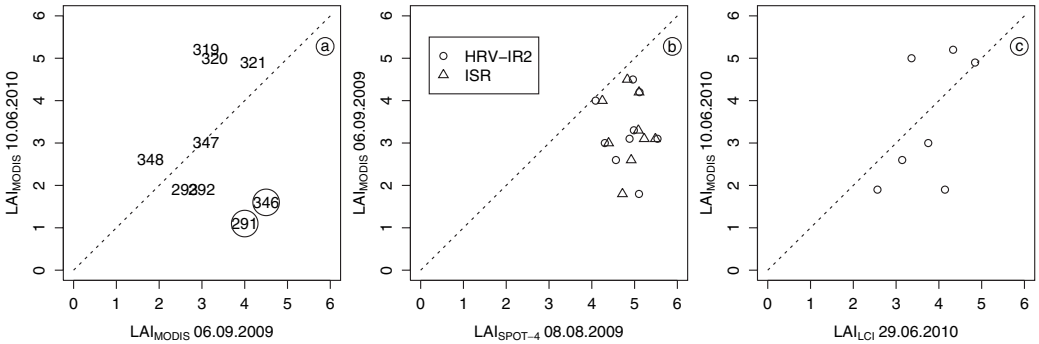


Joonis 7. SPOT-4 HRV-IR2 ja *LCI* indeksi alusel saadud lehepinnaindeksi kaardid (a, b). Keskmised LAI_{LCI} väärtused 64 $LAI_{HRV-IR2}$ ja LAI_{ISR} klassis (c, d). Ringid on proportsionaalsed ruutjuurega pikslite arvust. Suurimas klassis on 5300 pikslit. Tulbad näitavad kolmekordset standardviga.

Figure 7. LAI maps based on SPOT HRV-IR2 and LCI (a, b). Average LAI_{LCI} *in 64 classes from* $LAI_{HRV-IR2}$ *and* LAI_{ISR} *maps (c, d). Circle size is proportional to the square root of pixel count in class. The largest class size was 5300 pixels. Triple standard error is shown with bars.*

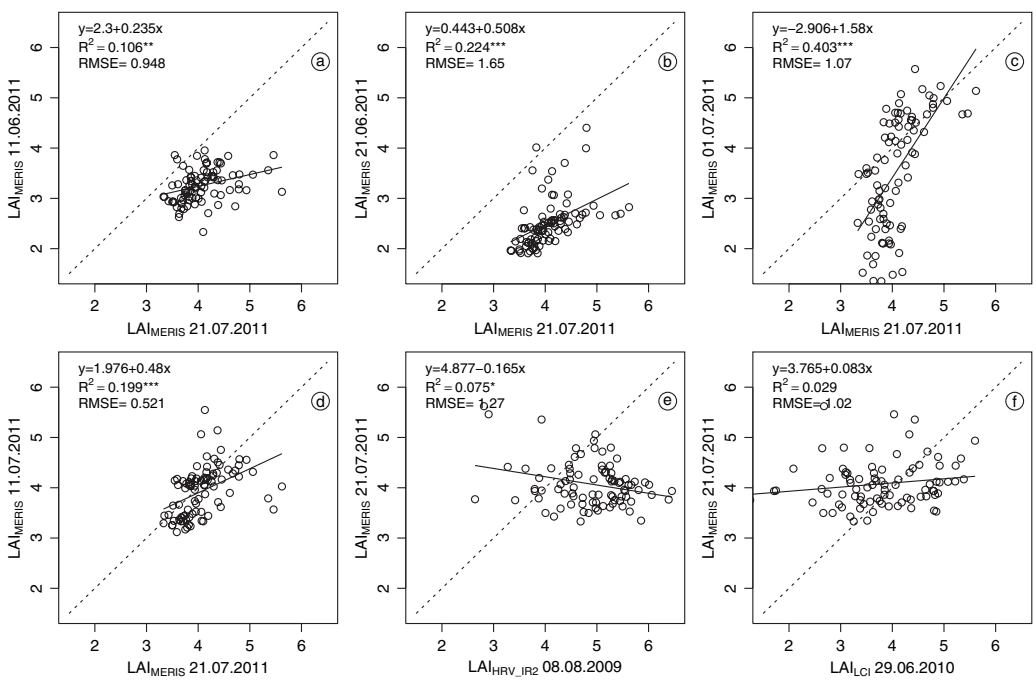
vat lehepinnaindeksi hinnangut, kuid ilmnes, et 21. juuni ja 1. juuli kaardid on probleemsed (joonised 9a–9d), kuigi veakontrolli kaardil märkused puudusid. MODISe ja MERISe juunikuised LAI keskväärtuste hinnangud olid testala kohta sarnased (tabel 2). MERISe juuli teise poole LAI hinnang oli suurem MODISe aasta varasemast septembrikuisest keskmisest LAIst. Kuigi võrdluses on erinevate aastate kaardid, pole teadaolevalt testalal toimunud suuri häiringuid ja seega peaks üldjuhul 2011. ja 2009. aasta LAI hinnangud olema üldiselt samad või MODISe tegeliku rohelise LAI hinnang pisut suurem MERISe efektiivse rohelise LAI hinnangust. Mõningast lehepinnaindeksi suurenemist võiks eeldada metskonna ala kuivendussüsteemide rekonstrueerimise tagajärjel paranenud kasvutingimuste tõttu.

Proovitükkidelt kogu testala kohta laiendatud $LAI_{HRV-IR2}$ ja LAI_{LCI} kaartidel MERISe LAI hinnanguga lineaarseos puudus (joonised 9e, 9f). MERISe LAI keskväärtus jäi 2011. aasta 21. juuli kaardil madalamaks 2009. aasta juulis maapealsete mõõt-



Joonis 8. Kahe järjestikuse aasta MODISe LAI võrdlus pikslite kaupa testalal (a) ning võrdlus maapealsete mõõtmiste abil saadud mudelite järgi koostatud $LAI_{HRV-IR2}$, LAI_{ISR} ja LAI_{LCI} kaartidega (b, c).

Figure 8. Pixel-wise comparison of MODIS LAI product over test site from two consequent years (a). Comparison of MODIS LAI to ground measurements based upscaled $LAI_{HRV-IR2}$, LAI_{ISR} and LAI_{LCI} (b, c).



Joonis 9. ENVISAT MERISe 2011. aasta LAI hinnangute võrdlus Järvselja VALERI testalal (a–d) ja maapealsete mõõtmiste põhjal saadud $LAI_{HRV-IR2}$ ning LAI_{LCI} kaartidega (e, f).

Figure 9. Pixel-wise comparison of ENVISAT MERIS LAI product from different dates (a–d) and scatterplots of upscaled $LAI_{HRV-IR2}$ and LAI_{LCI} maps against MERIS LAI from 21. July 2011 (e, f).

Tabel 2. Järvselja VALERI testala LAI hinnangud. MODIS, ISR ja HRV-IR2 annavad taimkatte summaarse tegeliku LAI, MERIS annab taimkatte efektiivse LAI ja LCI puurinde LAI hinnangu.
Table 2. Descriptive statistics of LAI over Järvselja VALERI test site. MODIS, ISR and HRV-IR2 give total true LAI estimates, MERIS gives total effective LAI and LCI gives true LAI of trees.

Allikas *Source*	Kuupäev *Date*	Piksleid *Pixels*	LAI hinnang / *LAI estimate*				
			Vähim *Min*	Suurim *Max*	Keskmine *Average*	St. hälve *St. Dev.*	St. viga (95%) *St. Error (95%)*
MODIS	06.09.2009	9	1,80	4,50	3,28	0,84	0,55
MODIS	10.06.2010	9	1,10	5,20	3,22	1,16	0,76
MODIS	10.06.2010	7	1,90	5,20	3,50	1,49	1,10
MERIS	11.06.2011	87	2,33	3,95	3,26	0,33	0,07
MERIS	21.06.2011	87	1,91	4,40	2,51	0,49	0,10
MERIS	01.07.2011	87	1,35	5,57	3,53	1,14	0,24
MERIS	11.07.2011	87	3,12	5,55	3,93	0,49	0,10
MERIS	21.07.2011	87	3,33	5,62	4,08	0,46	0,10
HRV-IR2	08.08.2008	22500	0,01	10,25	4,82	1,33	0,02
ISR	08.08.2008	22500	-0,68*	9,92	4,90	1,07	0,01
LCI	29.06.2010	22500	0,00	15.00	3,72	1,91	0,02

* Negatiivse LAI väärtusega olid 18 pikslit.
** Negative LAI values were found on 18 pixels.*

miste alusel saadud $LAI_{HRV-IR2}$ ja LAI_{ISR} keskmistest, aga oli erinevalt MODISe LAIst suurem puurinde LAI hinnangu LAI_{LCI} keskväärtusest (joonis 9f, tabel 2). Kuna MERISe produktil on taimkatte efektiivne roheline lehepinnaindeks (Poilvé, 2011; GEOLAND, 2011) ning maapealsete mõõtmiste laiendused $LAI_{HRV-IR2}$ ja LAI_{ISR} on taimkatte tegeliku rohelise taimkatte LAI hinnangud, siis võiks pidada MERISe LAI produkti MODISe LAI produktist usaldusväärsemaks. Siiski on suvistel MERISe LAI hinnangutel üsnagi suur hajuvus eeldatavast trendist (joonised 9a–9d) ja ka käesolevas katses võib kokkulangevus maapealsete mõõtmistega olla juhuslik.

Arutelu

Maapealsete punktmõõtmiste info laiendamine ja üldistamine suuremale territooriumile on oluline probleem paljudes uuringutes, kus tunnuste täpse väärtuse mõõtmine on kallis. Üks sellistest uuringutest on näiteks statistilisel valimil põhinev metsainventuur, mille abil saadakse klassikaliselt keskmised takseernäitajad riigi või maakonna tasemel (Adermann, 2010). Paljudes riikides on võetud statistilise metsainventuuri süsteemis kasutusele mudelil põhinev disain, kus hinnangute üldistamine tugineb peamiselt multispektraalsete satelliidipiltidele. Tulemuseks on üldiselt täpsemad hinnangud võrreldes vaid proovitükkide kasutamisega ja lisaväärtusena tekib hinnatava tunnuse kaart, mille saamine näiteks lihtsalt interpoolimistehnika abil ei ole maapealsete proovitükkide vähest arvu arvestades võimalik. Üksiku puistu tasemel takseertunnuste hinnangud satelliidipiltide põhjal on siiski suure veaga (Tamm & Remm, 2009).

Taimkatte selliste struktuuriparameetrite nagu katvus, liitus või lehepinnaindeks ning sellega seonduva süsinikuringet otseselt mõjutava primaarproduktsiooni või näiteks kliimat mõjutavate terpeenide ja isopreenide metsadest lendumise (Noe *et al.*, 2011) hindamiseks suurtel aladel ja globaalselt ei ole satelliitkaugseirele alternatiive. Siiski on juba praegu rutiinselt toodetavate produktide kontrollimiseks vaja maapealseid testalasid. Erinevalt näiteks puude kõrguse või tüvemahu määramisest, on lehepinnaindeksi mõõtmine kontaktsete meetoditega väga töömahukas ja aeganõudev ning pole rakendatav suurel hulgal vaatlusaladel. Paljude biomassiuuringute

tulemusel tekib küll regressioonimudeleid, mis seostavad puu tüve rinnakõrguse läbimõõdu, kõrguse ja muud lihtsamini mõõdetavad tunnused lehemassiga (Marklund, 1988; Zianis *et al*., 2005; Uri *et al*., 2009), kuid nende mudelite kasutamisel näiteks tavametsakorralduse takseerandmetel või statistilise metsainventuuri andmetel ilmnevad tihti regionaalsed ning sisendtunnuste variatsioonile seatud piirangud (Lang *et al*., 2007). Seetõttu eelistatakse lehepinnaindeksi hindamiseks tihti optilisi maapealseid meetodeid.

Käesolevas uurimuses kasutati proovitükkide lehepinnaindeksi hindamiseks poolsfääripiltidelt ja taimkatte analüsaatoritelt LAI-2000 saadud läbipaistvuse andmeid. Testala kattev LAI kaart koostati multispektraalse satelliidipildi, topograafilise lennukilidari andmete ja proovitükkide andmetel saadud regressioonimudelite abil. Kahe täiesti erineva tunnuse, spektraalse heleduse ja lidarilt saadud katvuse, alusel saadud lehepinnaindeksi kaardid olid üldiselt sisuliselt kooskõlas. Siiski selgus, et alates LAI > 4,5 väärtuste korral tekib lidarilt saadud hinnangutes teatud küllastumine ja süstemaatiline allahinnang. Taolise mittelineaarsuse põhjusteks ei saa olla vead maapealsetes mõõtmisandmetes, sest nii SPOT-4 HRV-IR pildi kui ka lidari puhul kasutati regressioonimudelite loomiseks samu proovitükke.

Erinevuse võib põhjustada nii LAI ülehindamine multispektraalselt pildilt kui ka LAI alahindamine lidariandmestikust. Üheks erinevuse põhjuseks võib olla ALS50-II peegelduste tuvastamise algoritm, mis tihedamas lähiinfrapunase spektripiirkonna signaali tugevamalt hajutavas taimkattes registreerib impulsi kohta rohkem peegeldusi. See omakorda aga suurendab läbipaistvuse hinnangut ja arvutatav lehepinnaindeks on siis väiksem. Samuti võib olla abi LAI ja katvuse seose lähendamiseks kasutatud Korhonen *et al*. (2011) mudelile sõltumatute tunnuste lisamisest. Siiski vajavad multispektraalse pildi ja lidariandmete põhjal saadud lehepinnaindeksi süstemaatilised erinevused tihedamates taimkatetes edasist uurimist.

Selgus, et topolidari andmestik ei sobi hästi kogu taimkatte lehepinnaindeksi hindamiseks metsaökosüsteemis, sest väikesed vead maapinna kõrgusmudelis võivad põhjustada suuri erinevusi katvuse hinnangutes, kuna maapinna lähedal on gradient punktide kõrgusjaotuses väga suur. Osaliselt on taimkatte LAI lidarilt hindamise ebaõnnestumise põhjuseks ka vead ja ebapiisav keskmistamine proovitükil taimkatte analüsaatoriga maapinnalt kogutud läbipaistvuse andmestikus. Proovitüki keskpunkti suhtes risti kujuliselt paigutatud mõõtmispunktide korral jääb proovitüki tsentrist kaugenedes kirjeldamata süstemaatiliselt järjest suurem ala. Kui puurinde korral selle suurema kõrguse tõttu ruumiline keskmistamine taimkatte analüsaatoril töötab, siis läbi madala alustaimestiku on vaate teepikkus oluliselt lühem, variatsioon suurem ja mõõtmisi peaks seega tegema oluliselt rohkem. Lisaks on LAI-2000 mõõtmisskeemis kaks sensorit ja seega on oluline mõju võimalikul valgustatuse erinevusel. Lagedamatele aladele taimkatte analüsaatoriga saadud läbipaistvuse võrdlemisel poolsfääripiltidelt saaduga selguski, et ka täiesti lagedal alal võib üksteisest kaugel asuvate sensorite kohal olevast valgustatuse erinevusest tekkida oluline viga.

Ka poolsfääripiltidelt taimestiku läbipaistvuse hindamise metoodikas on mitmeid veaallikaid: pildi projektsioonimoonutused, signaali vinjeteerimine, kaamerasisene värvisignaali mittelineaarne gammakorrektsioon, värvisignaali pikslilt pikslile interpoolimise mõju ning lõpuks töötleja subjektiivne otsus taeva ja taimkatteelementide eristusreegli määramisel.

Läbipaistvuse arvutamiseks kasutatud programm CAN-EYE võimaldab küll automaatset pikslite klassifitseerimist, kuid sellest tuleb tavaliselt loobuda, sest vastav meetod kipub läbipaistvust reeglina ülehindama ja taimestiku osakaalu pildil alahindama. Kõige efektiivsem on programmi

kasutades määrata üks klass, näiteks taevas, millesse tuleb operaatoril käsitsi määrata kõik taevale vastavad pikslid. Kõik ülejäänud pikslid määrab programm automaatselt taimestikku (antud juhul puuvõra) esindavaks klassiks. Kuid ka käsitsi pikslite ühte klassi määramisel tekib probleem, st. operaator peab visuaalselt, vaid piltide vaatlemise põhjal otsustama, milliseid piksleid ta näiteks taevast esindavasse klassi valib. Sellist konkreetsest operaatorist lähtuvat (subjektiivset) optimaalse diskrimineerimisnivoo valiku probleemi saab mõnevõrra leevendada mitme erineva operaatori kasutamisega sama andmestiku töötlemisel. See on aga väga töömahukas protsess, mis operaatorist lähtuvat subjektiivsust nivoo valimisel ikkagi ei eemalda, vaid võimaldab LAI arvutamiseks kasutada erinevate operaatorite poolt leitud läbipaistvuse keskväärtust. Seetõttu tuleb edaspidi eelistada mittesubjektiivseid ja automatiseeritavaid poolsfääripiltide töötlemise meetodeid (Lang *et al.*, 2010), mis võimaldavad LAI hindamiseks koguda usaldusväärse läbipaistvuse andmestiku.

Optiliste meetodite abil saadud läbipaistvuse põhjal on metsas võimalik saada vaid taimkatteindeksi *PAI* efektiivväärtuse hinnang, milles sisaldub nii lehestik kui ka puitunud osa. Tegeliku lehepinnaindeksi hinnangu saamiseks kasutati käesolevas uurimuses puistu struktuuri arvestava teoreetilise läbipaistvuse mudeli pööramist. Sama inversiooniprotseduuri testimisel erinevaid allomeetrilisi puuvõra raadiuse ja lehemassimudeleid kasutades leidis Lang (2006), et inversiooni tulemus sõltub veidi näiteks algsest lehepinnaindeksi hinnangust ning oluliselt liituse ja katvuse ning puude ruumilist paiknemist kirjeldava tunnuse väärtustest. Mõningatel juhtudel ei olnudki teoreetilise läbipaistvuse mudeli inversioon võimalik (Lang, 2006).

Eeldusel, et Nilson & Kuusk (2004) metsa läbipaistvuse mudelis ei ole vigu ja oluliste sisendtunnuste väärtused on usaldusväärsed, peaks inversioonist saadud lehepinnaindeksi väärtus olema kooskõlas antud puistu jaoks sobiva allomeetrilise mudeliga saadud hinnanguga. Käesolevas uurimuses oli aga allomeetrilise lehepinnaindeksi ning poolsfääripiltide põhjal arvutatud efektiivse lehepinnaindeksi seos üsna suure hajuvusega. Hajuvus ei kahanenud oluliselt ka allomeetrilise ja läbipaistvuse mudeli inversioonist saadud lehepinnaindeksite seoses. Mõnel juhul asus proovitükk puistu servale lähedal, mis võis mõjuda mõõdetud läbipaistvusele. Siiski on suurimaks probleemiks liituse ja katvuse hinnangu võimalikud vead, mis tulenevad kasutatud allomeetriliste võramudelite probleemidest ning katvuse hindamiseks vajalike vaatluste vähesusest (vaid 12 pilti igal proovitükil). Täpsema katvuse hinnangu saamiseks oleks üldiselt vaja vähemalt kümme korda rohkem vaatlusi (Rautiainen *et al.*, 2005). Kuigi laserskanneri andmestik tundub olevat heaks alternatiiviks maapealsele suhteliselt aeganõudvale katvuse hindamisele, pole üheselt selge, millistele peegeldustele tuginevad statistikud aluseks võtta (Lang, 2010).

Proovitükkidele välimõõtmistel saadud lehepinnaindeksi väärtused seostati kaardi koostamiseks multispektraalselt keskmise ruumilise lahutusega satelliidipildilt mõõdetud heleduste ning lidariandmestikust eraldatud 3D punktiparvedele arvutatud statistikutega. Mõlemal juhul suurendavad mudeli hajuvust proovitüki asukohamäärangu vead. Näiteks Lang *et al.* (2005) leidsid metsa kasvukäigu proovitükkidel Landsat-5 TM piltide abil muutuste tuvastamise katses, et kuni 10 m asukohaviga võib proovitüki heleduse väärtuse hinnangut mõjutada isegi üle 10%, kuigi kasvukäiguproovitükid on üldiselt servadest kaugemal. Kokkuvõttes mõjuvad nii rasterpildi piksli ja proovitüki suuruse suhe, pildi geomeetrilise korrektsiooni jääkviga, mis tavaliselt on pool pikslit, kui ka proovitüki asukohaviga.

Globaalseid lehepinnaindeksi produkte peetakse sobivaks väikese lehepinnaindeksiga taimestiku jaoks. Sea *et al.* (2011) näitavad, et MODISe LAI produkt on kasuta-

tav Austraalia savannis, kus $LAI \leq 1$. Wang *et al*. (2004) leidsid Soome hõredates okaspuupuistutes, kus üldiselt oli $LAI \leq 2{,}5$ ja MODISe pikslist suuremate alade keskmisena $LAI \leq 1{,}5$, et MODISe LAI algoritmiga saadud hinnangud on kooskõlas maapealsete mõõtmistega.

Järvselja VALERI testalal tehtud uuring aga näitas, et oluliselt suurema lehepinnaindeksiga segametsades on siiski probleeme. Maapealsete mõõtmiste põhjal koostatud lehepinnaindeksi kaartide võrdlemisel Järvselja VALERI testalal Terra MODISe ja ENVISAT MERISe standardsete globaalsete lehepinnaindeksi kaartidega selgus, et viimased hindasid taimkatte lehepinnaindeksit alla. ENVISAT MERISe produktilt saadud efektiivse rohelise LAI hinnang oli maapealsetele mõõtmistulemustele lähemal Terra MODISe produkti tegeliku rohelise lehepinnaindeksi hinnangust, kuigi pidanuks olema just vastupidi. Globaalsete produktide LAI hinnangud erinevatel ajahetkedel läbi vegetatsiooniperioodi ei ole pikslite kaupa stabiilsed, kuigi testalal pole olnud olulisi häiringuid. Sellised vead viitavad tõenäoliselt pilvede tuvastamise algoritmi probleemidele.

Kokkuvõte

Rutiinselt satelliitmõõtmistel põhinevate oluliste kliimat kujundavate muutujate, nagu taimkatte lehepinnaindeksi, kaardistamine globaalselt ja lokaalselt on oluline Maa kliimamuutuste analüüsil. Selliste kaartide kontroll testaladel, kus on olemas maapealsete mõõtmiste alusel saadud usaldusväärsed hinnangud, on oluline vigade leidmiseks ja algoritmide täiustamiseks.

Järvselja VALERI 3×3 km testala kohta koguti läbipaistvuse andmed taimkatte analüsaatorite LAI-2000 ja poolsfääripiltide abil ning arvutati puurinde tegeliku rohelise lehepinnaindeksi ja kogu taimkatte lehepinnaindeksi hinnang. Taimkatte läbipaistvuse mõõtmine metsas ei ole lihtne – taimkatte analüsaatori puhul tekib oluline viga kahe üksteisest kaugel oleva sensori kasutamisest ja tavaliste gammakorrektsiooniga poolsfääripiltide töötlemiseks laialdaselt kasutatav klassifitseerimistehnika sõltub väga palju operaatori subjektiivsest otsusest. Tegeliku rohelise lehepinnaindeksi hindamine metsa läbipaistvuse mudeli inversiooni abil nõuab puistu struktuuri, katvuse ja liituse andmeid, mille vead kanduvad edasi tulemustesse.

Testalale taimkatte lehepinnaindeksi kaardi koostamiseks osutusid sobivateks tunnusteks SPOT-4 HRV-IR punase spektripiirkonna heledus ja infrapunakanalite heleduste suhte indeks. Maailmas palju kasutatav NDVI indeks lehepinnaindeksiga seoses ei olnud. Kogu taimkatte lehepinnaindeksi arvutamine lidari ALS50-II andmetest on problemaatiline, puurinde lehepinnaindeksi ennustamiseks sobib kõikide peegelduste järgi arvutatud läbipaistvus.

Selgus, et taimkatte lehepinnaindeksi kasvuga lähenevad multispektraalse pildi ja lidarilt läbipaistvuse järgi arvutatud hinnangud kuni LAI väärtuseni 4,5, millest alates lidarilt saadav puurinde LAI hinnang küllastub. Kuna puurinde suurema lehepinnaindeksi korral on alustaimestiku osakaal kogu LAIs suhteliselt väiksem, siis eeldatavalt pidanuks kaks hinnangut teineteisele pigem lähenema.

Globaalse ulatusega MODISe ning MERISe LAI kaartide testimisel selgus, et neis esineb suhtelisel palju hajuvust, mille põhjuseks võib olla algoritmide suutmatus korralikult pilvede mõjuga arvestada ja eriti MODISe süsteemi puhul ka geokorrektsiooni vead. MODISe LAI kaartidelt leiti, et segametsa LAI on Järvseljal võrreldes maapealsete mõõtmistega alla hinnatud. MERISe produktilt saadav lehepinnaindeks on mõõtmisandmetega keskmiselt pigem kooskõlas.

Tänuavaldused. Artikli valmimisel ja andmete kogumisel olid toeks Keskkonnainvesteeringute Keskuse Metsanduse programm, Eesti Teadusfondi grandid ETF8290, ETF7725 ning riikliku sihtfinantseerimise

grandid SF0060115s08 ja SF0170014s08. Palju tänu retsensentidele kasulike märkuste eest.

Kasutatud kirjandus

Adermann, V. 2010. Estonia. – Tomppo, E., Gschwantner, T., Lawrence, M., McRoberts, R.(eds.). National Forest Inventories. Springer, 171–184.

Ahern, F.J., Erdle, T., Maclean, D.A., Kneppeck, I.D. 1991. A quantitative relationship between forest growth rates and Landsat Thematic Mapper reflectance measurements. – International Journal of Remote Sensing, 12(3), 387–400.

Anderson, M.C. 1964. Studies of the woodland light climate. I. The photographic computation of light condition. – Journal of Ecology, 52, 27–41.

Baltsavias, E.P. 1999. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. – ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54, 199–214.

Brown, L., Chen, J.C., Leblanc, S.G., Cihlar, J. 2000. A shortwave infrared modification to the simple ratio for LAI retrieval in boreal forests. – Remote Sensing of Environment, 71, 6–25.

Chason, J.W., Baldocchi, D.D., Huston, M.A. 1991. Comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf-area. – Agricultural and Forest Meteorology, 57, 107–128.

Chen, J.M., Black, T.A. 1992. Defining leaf-area index for non-flat leaves. – Plant, Cell & Environment, 15, 421–429.

Evans, G.C., Coombe, D.E 1959. Hemispherical and woodland canopy photography and the light climate. – Journal of Ecology, 47, 123–144.

Fassnacht, K.S., Gower, S.T., Norman, J.M., McMurtrie, R.E. 1994. A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forests. – Agricultural and Forest Meteorology, 71, 183–207.

Fernandes, R.A., Miller, J.R., Chen, J.M., Rubinstein, I.G. 2004. Evaluating image-based estimates of leaf area index in boreal conifer stands over a range of scales using high-resolution CASI imagery. – Remote Sensing of Environment, 89, 200–216.

Frazer, G.W., Trofymow, J.A., Lertzman, K.P. 1997. A method for estimating canopy openness, effective leaf area index, and photosynthetically active photon flux density using hemispherical photography and computerized image analysis techniques. – Information Report BC-X-373. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, Victoria, BC.

Garrigues, S., Allard, D., Baret, F., Weiss, M. 2006. Quantifying spatial heterogeneity at the landscape scale using variogram models. – Remote Sensing of Environment Volume 103(1), 81–96.

Gemmell, F., Varjo, J., Strandstrom, M., Kuusk, A. 2002. Comparison of measured boreal forest characteristics with estimates from TM data and limited ancillary information using reflectance model inversion. – Remote Sensing of Environment, 81(2-3), 365–377.

GEOLAND. 2011. BioPar Products. [WWW document]. – URL http://www.geoland2.eu/portal/. [Accessed August 1, 2011].

Gower, S.T., Norman, J.M. 1991. Rapid estimation of leaf-area index in conifer and broad-leaf plantations. – Journal of Ecology, 72, 1896–1900.

Herbert, T.J. 1986. Calibration of fisheye lenses by inversion of area projections. – Applied Optics, 25, 1875–1876.

Heritage, G.L., Large, A.R.G. 2009. Principles of 3D Laser Scanning. – Laser Scanning for the Environmental Sciences, 21–34. Eds Heritage, G.L., Large. John Wiley & Sons, Ltd., Publication, West Sussex, UK.

Hopkinson, C., Chasmer, L. 2009. Testing LiDAR models of fractional cover across multiple forest ecozones. – Remote Sensing of Environment, 113, 275–288.

Hordo, M., Kiviste, A., Sims, A. 2006. The Network of permanent sample plots for forest growth in Estonia. – Nagel, J. (ed.). Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten. Sektion Ertragskunde: Beiträge zur Jahrestagung 2006. Göttingen, 115–121.

Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., Baret, F. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. – Agricultural and Forest Meteorology, 121, 19–35.

Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P. 2005. Assessment of automatic grap fraction estimation of forests from digital hemispherical photography. – Agricultural and Forest Meteorology, 132, 96–114.

Knyazikhin, Y., Martonchik, J.V., Myneni, R.B., Diner, D.J., Running, S.W. 1998. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. – Journal of Geophysical Research, 103, 32257−32274.

Kodar, A., Kutsar, R., Lang, M., Lükk, T., and Nilson, T. 2008. Leaf area indices of forest canopies from optical measurements. – Baltic Forestry, 14(2), 185–194.

Korhonen, L. Korpela, I., Heiskanen, J., Maltamo, M. 2011. Airborne discrete-return LIDAR data in the estimation of vertical canopy cover, angular canopy closure and leaf area index. – Remote Sensing of Environment, 115, 1065–1080.

Kucharik, C.J., Norman, J.M, Gower, S.T. 1998. Measurements of branch area and adjusting leaf area index indirect measurements. – Agricultural and Forest Meteorology, 91(1–2), 69–88.

Lang, M. 2006. The performance of foliage mass and crown radius models in forming the input of a

forest reflectance model. – PhD thesis. ISBN-10: 9949-426-16-2. Eesti Maaülikool, 201 pp.

Lang, M. 2010. Estimation of crown and canopy cover from airborne lidar data. – Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused, 52, 5–17.

Lang, M. Lükk, T., Rähn, A., Sims, A. 2005. Kasvukäiguproovitükkide kaugseire võimalusi. (Change detection on permanent forest growth sample plots using satellite images). – Metsanduslikud Uurimused / Forestry Studies, 43, 24–37. (In Estonian).

Lang, M., Kurvits, V. 2007. Restoration of tree crown shape for canopy cover estimation. – Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused, 46, 23–34.

Lang, M., Kuusk, A., Mõttus, M., Rautiainen, M., Nilson, T. 2010. Canopy gap fraction estimation from digital hemispherical images using sky radiance models and a linear conversion method. – Agricultural and Forest Meteorology, 150(1), 20–29.

Lang, M., Nilson, T., Kuusk, A., Kiviste, A., Hordo, M. 2007. The performance of foliage mass and crown radius models in forming the input of a forest reflectance model: A test on forest growth sample plots and Landsat 7 ETM+ images. – Remote Sensing of Environment, 110, 445–457.

Liang, S. 2004. Quantitative remote sensing of land surfaces. 534 pp. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Yersey.

Marklund, L.G. 1988. Biomass functions for pine, spruce and birch in Sweden. – Technical Report, Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Survey, Umeå, Sweden, 45, 73 pp.

McGaughey, R.J. 2010. FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization. July 2010 – FUSION Version 2.90. United States Department of Agriculture Forest Service Pacific Northwest Research Station, 150 pp.

Morsdorf F., Benjamin Kötz, B., Meier, E., Itten, K.I., Allgöwer, B. 2006. Estimation of LAI and fractional cover from small footprint laser scanning data based on gap fraction. – Remote Sensing of Environment, 104, 50–61.

Nilson, T. 1994. Remote sensing of forests. (Metsade kaugseire alused). Eesti Põllumajandusülikooli Metsakorralduse Instituut. 160 pp.

Nilson, T. 1999. Inversion of gap fraction data in forest stands. – Agricultural and Forest Meteorology, 98–99, 437–448.

Nilson, T., Kuusk, A. 2004. Improved algorithm for estimating canopy indices from gap fraction data in forest canopies. – Agricultural and Forest Meteorology, 124(3–4), 157–169.

Noe, S.M., Kimmel, V., Hüve, K., Copolovici, L., Portillo-Estrada, M., Püttsepp, Ü., Jõgiste, K., Niinemets, Ü., Hörtnagl, L., Wohlfahrt, G. 2011. Ecosystem-scale biosphere-atmosphere interactions of a hemiboreal mixed forest stand at Järvselja, Estonia. – Forest Ecology and Management, 262(2), 71–81.

Poilvé, H., 2011. Towards an operational GMES land monitoring core service. BioPar product user manual. MERIS FR Biophysical Products. Issue 1.40. EC Proposal Reference No. FP-7-218795. Astrium GeoInformation Services. 46 pp.

Rautiainen, M., Stenberg, P., Nilson, T. 2005. Estimating canopy cover in Scots pine stands. – Silva Fennica, 39(1), 137–142.

Sea, W.B., Choler, P., Beringer, J., Weinmann, R.A, Hutley, L.B, Leuning, R. 2011. Documenting improvement in leaf area index estimates from MODIS using hemispherical photos for Australian savannas. – Agricultural and Forest Meteorology, 151, 1453–1461.

Stenberg, P., Rautiainen, M., Manninen, T., Voipio, P., Smolander, H. 2004. Reduced simple ratio better than NDVI for estimating LAI in Finnish pine and spruce stands. – Silva Fennica 38(1): 3–14.

Tamm, T., Remm, K. 2009. Estimating the parameters of forest inventory using machine learning and the reduction of remote sensing features. – International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 11, 290–297.

Tan, B., Woodcock, C.E., Hu, J., Zhang, P., Ozdogan, M., Huang, D., Yang, W., Knyazikhin,Y., Myneni, R.B. 2006. The impact of gridding artifacts on the local spatial properties of MODIS data: Implications for validation, compositing, and band-to-band registration across resolutions. – Remote Sensing of Environment, 105, 98–114.

Uri, V., Lõhmus, K., Kiviste, A., Aosaar, J. 2009. The dynamics of biomass production in relation to foliar and root traits in a grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench) plantation on abandoned agricultural land. – Forestry, 82, 61–74.

Ustin, S.L. 2004. Remote Sensing for natural resource management and environmental monitoring. Manual of remote sensing. John Wiley & Sons, Inc.

Vain A., Kaasalainen, S., Pyysalo, U., Krooks, A., Litkey, P. 2009. Use of naturally available reference targets to calibrate airborne laser scanning intensity data. – Sensors, 9, 2780–2796; doi:10.3390/s90402780.

Wang, Y., Woodcock, C.E., Buermann, W., Stenberg, P., Voipio, P., Smolander, H., *et al*. 2004. Evaluation of the MODIS LAI algorithm at a coniferous forest site in Finland. – Remote Sensing of Environment, 91, 114−127.

Watson, D.J. 1947. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. – Annals of Botany, 11, 41–76.

Zianis, D., Muukkonen, P., Mäkipää, R., Mencuccini, M. 2005. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. – Silva Fennica Monographs, 4, 1–63.

Leaf area index mapping with airborne lidar, satellite images and ground measurements in Järvselja VALERI test site

Ave Kodar, Mait Lang, Tauri Arumäe, Alo Eenmäe, Jan Pisek and Tiit Nilson

Summary

To analyze Earth`s climate change on routine remote sensing, it is important to map both globally and locally essential climate variables such as leaf area index (LAI). LAI was first defined in 1947 as the total one-sided area of photosynthetic tissue per unit ground surface area (Watson, 1947; Chen & Black, 1992). Testing LAI values on the ground campaigns gives us possibility to validate the actual quality of LAI maps produced from satellite observations.

The aim of this study was to compile a LAI map for 3×3 km VALERI test site in Järvselja (Fig. 1) belonging to international VALERI (*Validation of Land European Remote sensing Instruments*, *http://www.avignon.inra.fr/valeri/*) project. Ground measurements of canopy gap fraction by the means of optically-based methods, such as LAI-2000 Plant Canopy Analyzers and digital cameras supplied with fisheye converters, were carried out according to VALERI protocol (Fig. 2) on 42 elementary sampling units in summer 2009, from July 28th to 31st.

Ground vegetation effective leaf area index $LAI_{eff,AT}$ was obtained from gap fraction measurements with LAI-2000 at ground level $T_{LAI2000G}$ and at breast height level $T_{LAI2000B}$ (Fig. 3). The true LAI for tree canopy LAI_{inv_trees} was obtained from inversion of canopy gap fraction model (Nilson & Kuusk, 2004) using transmittance T_{HI} calculated from hemispherical images with CAN-EYE program. Total LAI for sample plot was calculated with Eq. (1) (Fig. 4). Spectral radiance and several predictive variables (Eq. 2, 3, 4) derived from SPOT-4 HRV-IR image (August 8th, 2009) were tested for sample plot level LAI up-scaling over the test area (Fig. 5). However, only the radiance in red channel and ISR index were found to be informative. Alternatively, canopy transmittance was calculated using different sets of returns (Eq. 5, 6, 7, where h_p is the height of return) from airborne lidar ALS50-II (from June 29th, 2010) to get the regressions to compile the LAI maps of VALERI test site (Fig. 6). Eq. (8) was fitted on the all-return based transmittance $T_{Lidar_1,3_PK}$ for up-scaling of tree canopy LAI.

Comparison of LAI maps up-scaled using SPOT-4 HRV-IR red channel radiance or ISR index to the lidar $T_{Lidar_1,3_PK}$ based maps revealed an apparent saturation of lidar data based map at values LAI > 4.5 (Fig. 7). This was contradictory to the expected asymptotical shape of the relationship, since at higher LAI values the influence of forest understory vegetation decreases (Fig. 3) and both – multispectral data based vegetation total LAI and lidar data based tree canopy LAI are expected to be similar. The reasons for the saturation phenomena require further study.

Finally, up-scaled LAI maps were used to test consistency of global LAI products from Terra MODIS and ENVISAT MERIS systems. We found rather large non-natural variability when comparing subsequent MODIS LAI maps over test site (Fig. 8). MODIS LAI of mixed forests that are prevailing in MODIS land cover map over the test site was underestimated compared to the ground measurements (Table 2). Random noise was present also in the seasonal time series of MERIS LAI product (Fig. 9). However, average MERIS LAI over test site was found to be more close to the up-scaled value (Table 2), despite the fact that MODIS LAI represents true green leaf area index and MERIS LAI is the effective green leaf area index.

Received January 12, 2012, revised February 27, 2012, accepted March 25, 2012