

Tartu Ülikool
Füüsika-keemia teaduskond
Füüsikalise keemia instituut

Sandra Suviste

**Mõnede Eesti metsatüüpide heleduskordajate
sesoonne käik mudelarvutustest ja satelliidipiltidelt**
Magistritöö keskkonnatehnoloogia erialal

Juhendaja: geof dr Tiit Nilson

Tartu 2007

SISUKORD

SISSEJUHATUS	3
JÄRVSELJA METSAD.....	5
Valitud metsatüübid	5
SATELLIIDIPILDID	8
Aegridade silumine	8
MUDELARVUTUSED.....	10
TULEMUSED	14
1. Kuusikud.....	14
2. Kaasikud	15
3. Männikud.....	19
4. Rabamännikud.....	20
DISKUSSIOON.....	22
Mudelarvutused	23
KOKKUVÕTE	26
SUMMARY	27
KASUTATUD KIRJANDUS.....	28
LISA.....	30
Tabel 1. Kasutatud satelliidipiltide andmed.....	30
Tabel 2. Landsati ja SPOTi skannerite lainepikkuste vahemikud.....	31
Tabel 3. Mudelarvutused: Päikese kõrgus.....	32
Tabel 4. Mudelarvutuste käigus muudetud olulisemad parameetrid.....	33
Tabel 5. Simuleeritud ja satelliidipiltidelt saadud heleduskordajate vahelised ruutkeskmise hälbe (RMSD) väärtused.....	34

SISSEJUHATUS

Kaasaegse kosmilise kaugseire üks rakendusi on taimkattes toimuvate sesoonsete muutuste jälgimine nii globaalselt kui ka regionaalselt. Lisaks aastaegade vaheldumisest tingitud ilmsetele muutustele kinnituse saamisele avaneb satelliitkaugseire abil võimalus uurida sesoonseid muutusi taimkattes ka kvantitatiivselt. Lisaks võimalustele saada taimkatte kohta kvantitatiivseid hinnanguid kaugseire teel, on kasutada hulgaliselt meteoroloogilist infot nii maapealsetest allikatest kui ka satelliitidelt. Saab teha kindlaks sesoonsete muutuste kvantitatiivsed seosed meteoroloogiliste faktoritega, samuti uurida võimalikke kaasaegseid fenoloogiliste muutuste trende seoses kliimamuutustega jms. Siiski pole need uued kaugseire võimalused leidnud seni veel piisavalt rakendamist, eriti mis puudutab erinevates metsatüüpides ja väiksemal territooriumil toimuvaid fenoloogilisi muutusi. Praeguse aja parimini välja arendatud algoritmidega satelliidisüsteem on NASA Terra ja Aqua platvormidel paiknev MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). MODISe taimkatet iseloomustavate valmis“produktide” hulgas on sesoonselt mutuva parameetrina näiteks lehepinnaindeks (LAI) – roheliste taimlehtede kogupindala maapinnaühiku kohta. Globaalsed 8 päeva LAI kaardid 1x1 km ja 4x4 km lahutusega on MODISe meeskonna poolt toodetuna kõigile kättesaadavad.

Erinevalt jämedama ruumilise lahutusega satelliidisüsteemidest (nt MODIS, piksli suurus alates 250m), mis annavad pidevalt informatsiooni taimkatte heleduse muutumise kohta kasvusesooni jooksul üle kogu maailma, on suurema lahutusvõimega satelliitidelt saadav info taimkatte heleduste sesoonse käigu kohta küllaltki piiratud. Käesolevas töös vaadeldakse kõrgema lahutusega (20-30m) satelliidipiltide kasutamist erinevate metsatüüpide heleduse sesoonsete muutuste kirjeldamisel. Sellist analüüsi ei saa teha tüüpilisel Eesti maastikul, kasutades MODISe pilte ja valmistoodangut, sest näiteks 1x1 km piksli suuruse juures ei ole praktiliselt võimalik eristada erinevaid metsatüüpe. Ehkki ka MODISe puhul on, selleks et pildiinfost tuletada näiteks lehepinnaindeksi hinnanguid, vaja lahendada skanneri kaliibrimise ja atmosfäärikorrekttsiooni probleemid, on MODISel õnnestunud need lahendada rahuldaval tasemel. Kõrgema lahutusega süsteemide, nagu antud töös kasutatavate Landsati ja SPOTi puhul, aga on kaliibrimise probleemid olulisemaks takistuseks andmete edasisel interpretatsioonil.

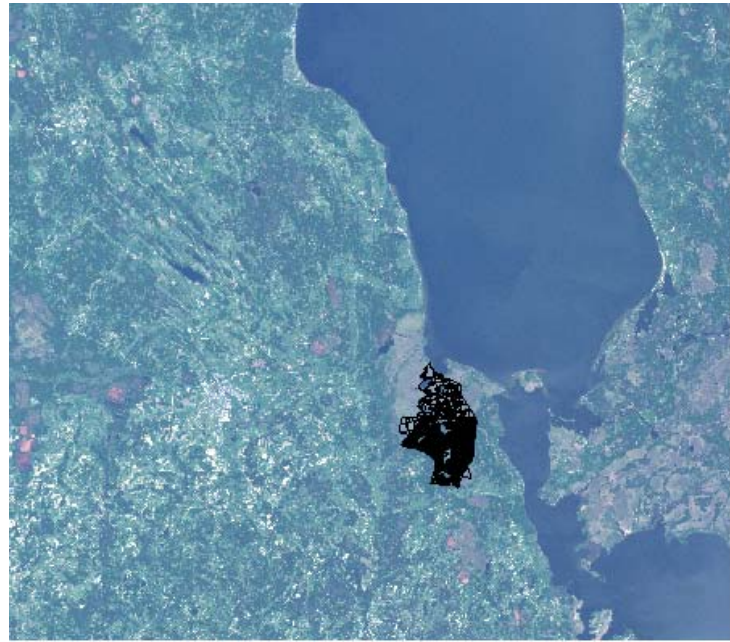
Kõrgematel laiuskraadide sageli esineva pilvisuse ja küllaltki harvade ülelendude tõttu on taimkatte heleduse aegridu kasvuhooaja vältel praktiliselt võimalik moodustada ainult erinevatel aastatel tehtud piltidest, mis aga eeldab, et piltidele tehtav atmosfäärikorrektsioon on adekvaatne. Samuti võivad aga ilmastikutingimused erinevate aastate vahel erineda ja sellest tingituna võib ka taimkatte fenoloogilise arengu kiirus mingil aastal oluliselt erineda taimede arengu kiirusest mõnel teisel aastal.

Käesolevas töös üritati Kuusk-Nilsoni metsa heleduse mudelit kasutades simuleerida kuue Eesti metsatüübi heleduse sesoonseid käike Landsat TM skanneri kanalitele vastavates lainepikkuste vahemikes. Arvutustele olid aluseks Järvelja õppe- ja katsemetskonna metsade kohal 17 aasta jooksul tehtud satelliidipiltidelt mõõdetud heleduste alusel moodustatud aegread, kus aastatevaheliste erinevuste leevendamiseks kasutati fenoloogilise aja mõõtühikuid.

Töö eesmärkideks oli saavutada satelliidipiltidelt arvutatutele võimalikult sarnaseid heleduskordajate käike ning välja selgitada, millised on olulisemad heleduskordajate väärtusi mõjutavad faktorid ning samuti, millised on mudelarvutuse käigus ilmnevad probleemid.

JÄRVSELJA METSAD

Uuritud metsad kuuluvad Järvelja õppe- ja katsemetskonna (Järvelja ÕKM; joonisel 1 märgitud musta värviga) koosseisu Eesti Maaülikooli juures. Umbes 10 000 hektarilise pindalaga Järvelja ÕKM asub Lõuna-Eestis Peipsi järve ääres madalal tasandikul. Oma asukoha tõttu kannatavad metsad tihti liigvee all, seda eriti varakevadel ja hilissügisel. Levinumateks puuliikideks on kask (*Betula pendula*, *Betula verrucosa*), harilik mänd (*Pinus sylvestris*) ja harilik kuusk (*Picea abies*), kasvukohatüüpidest on esindatud nii viljakate kasvukohtade naadi, angervaksa, ja jänesekapsa kasvukohatüübid kui ka väheviljakad raba, siirdesoo ja madalsoo ning sinika kasvukohatüübid.



Joonis 1. Järvelja õppe- ja katsemetskond ja selle lähiümbrus.

Valitud metsatüübid

Järvelja metsade 1993. a. andmebaasist eraldus.dbf valiti SQL (*Structured Query Language*) -päringute abil välja erinevat tüüpi metsad:

Kuusikud, kogupindalaga 57 ha;

Hea kasvukoha kaasikud (boniteet < 3), kogupindalaga 122 ha;

Kehva kasvukoha kaasikud (boniteet > 3), kogupindalaga 335 ha;

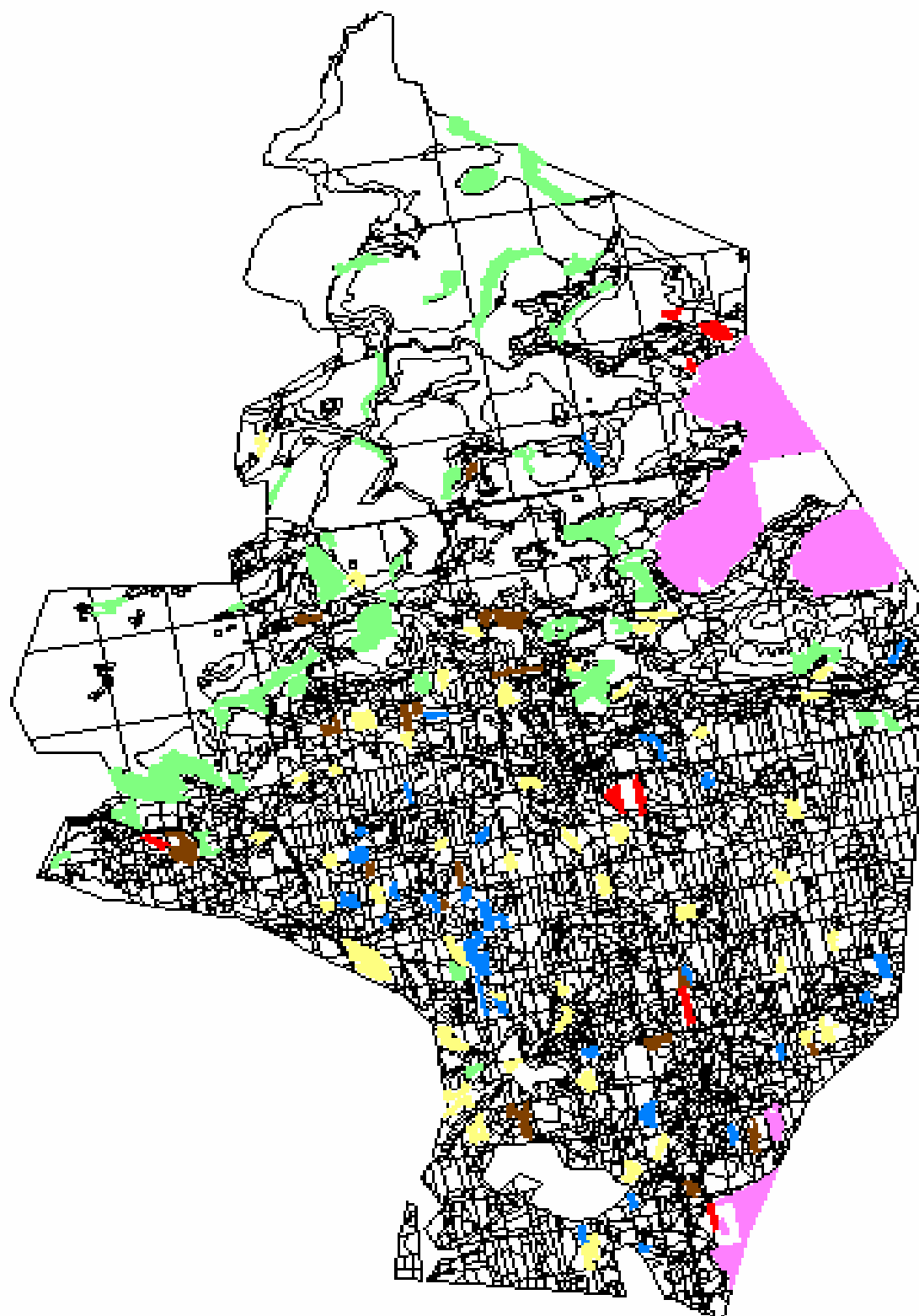
Hea kasvukoha männikud (boniteet < 3), kogupindalaga 23 ha;

Kehva kasvukoha männikud (boniteet > 3), kogupindalaga 25 ha;

Rabamännikud (tegemist on väga kehva kasvukohatüübiga), kogupindalaga 437 ha.

Joonisel 2 on toodud valikusse kaasatud metsatüüpide paiknemine Järvelja ÕKM piires.

Järvselja ÕKM



Joonis 2. Valikusse kaasatud Järvselja metsaeraldiste kaart. Sinise värviga on esindatud kuusikud, kollasega hea kasvukoha ja helerohelisega kehva kasvukoha kaasikud, punasega kehva ja pruuniga hea kasvukoha männikud, roosa värviga rabamännikud.

Päringusse kaasati keskmise vanusega metsad (puistu vanus 1993. a. 30-60 aastat), mille pindala oli vähemalt 1 hektar ja millest peapuuliik moodustas vähemalt 75% rinnaspindalast; valitud väärtused olid kompromissiks võimalikult suure pikslite arvu analüüsi kaasamise ja servapikslite valimisse sattumise vahel. Metsad, milles oli ajavahemikus 1993-2003 tehtud lageraiet, jäeti valimist välja.

Valitud metsatüüpidele vastavad pikslid valiti programmi PixelWin (Lükk, 1999) abil välja ka satelliidipiltidelt ning nende põhjal arvutatud heleduskordajate keskmistest väärtustest moodustati vastavate metsatüüpide heleduse aegread. Kuna pildid olid tehtud erinevatel aastatel, mil ilmastikutingimused (temperatuur) ja seetõttu ka taimede areng võisid olla erinevad, kasutati aastevaheliste erinevuste ühtlustamiseks fenoloogilist aega, kus ajateljel oli ühikuks 5°C ületanud ööpäeva keskmiste õhutemperatuuride kumulatiivne summa. Andmed temperatuuri kohta on pärit Tartu Meteoroloogiajaamast Tõraveres.

SATELLIIDIPILDID

Kasutatud satelliidipildid Järvelja alast keskpunktiga 58°15'N, 27°28'E olid pärit aastatest 1986-2003. Piltide andmed on toodud lisa, tabelis 1.

Pildid katsid praktiliselt kogu kasvuhooaja, võimaldades uurida sesoonseid muutusi mitmete Järvelja metsatüüpide heleduses erinevates Landsati kanalites. Kahekümne kolmest pildist olid üheksa SPOTi (enamuses SPOT 4) ja neliteist Landsat Thematic Mapperi (neist kaheksa Landsat 5 ja kuus Landsat 7 ETM+) pildid. Kuigi Landsati (TM) ja SPOTi kanalid üksüheselt ei kattu (lisa, tabel 2), loeti rohelises (SPOTi 1. kanal, TM2), punases (SPOTi 2. kanal ja TM3), lähiinfrapunases (SPOTi 3. kanal ja TM4) ning keskmises infrapunases lainelas (MIR; TM5 ja XS4) tehtud pildid ühte ja samasse kanalisse kuuluvaiks. Kuna SPOTil puuduvad Landsat TM1 ja TM7-le vastavad kanalid, on vastavates aegridades selle võrra vähem liikmeid.

Pildid seoti kindelpunkte kasutades Eesti baaskaardiga ja teisendati Lambert-Est'92 kaardiprojektsiooni, samasse milles on antud ka Järvelja digitaalne puistuplaan. Kõikidele piltidele tehti 6S algoritmi kasutades atmosfäärikorrektsioon (Vermote *et al.* 1997). Piltide eeltöötlus on tehtud Tartu Observatooriumis T. Lükki poolt. Atmosfäärikorrektsiooni tulemusena tuletati lineaarne seos digitaalnumbrite (DN) ja maapinnalähedase heleduskordaja (R) väärtuste vahel:

$$R_{ij} = DN_{ij} b_{ij} + a_{ij}, \quad (1)$$

Kus i – satelliidipildi number

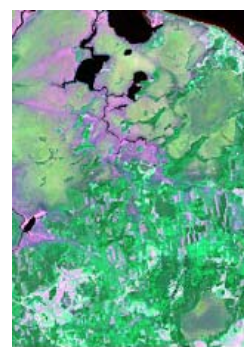
j – kanal

b_{ij} – i -nda satelliidipildi j -nda kanali tõus

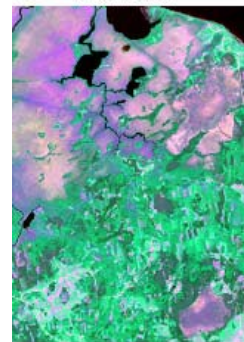
a_{ij} – i -nda satelliidipildi j -nda kanali vabaliige

Aegridade silumine

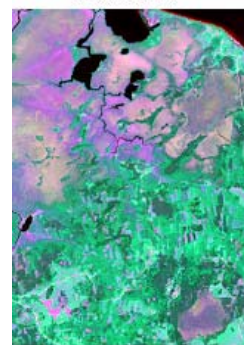
Kuna eri metsatüüpide jaoks metsanduslikke andmebaase ja PixelWini kasutades satelliidipiltidelt saadud aegread olid eriti nähtavas spektriosas küllaltki suure hajuvusega, rakendati saadud aegridadele silumist (Nilson *et al.* 2007). Selleks valiti tumedate objektidena kuusikud, hea kasvukoha männikud ja hea kasvukoha kaasikud (hea kasvukoha metsade heleduskordajate sesoonset muutumist mõjutab peamiselt päevaste keskmiste temperatuuride summa) ning heleda objektina



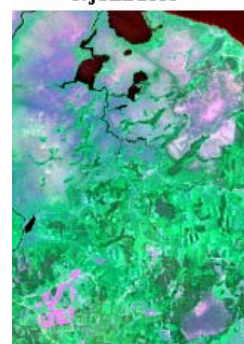
9. mai 2000



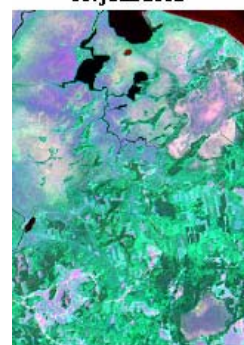
31. mai 2002



6. juuni 2000



18. juuli 2002



29. aug. 1997

Joonis 3. Valik kasutatud piltidest.. Valevärvipildid.

rabamännikud, mis on tuntud kui vähese muutlikkusega ökosüsteemid, mille puurinde ja alustaimestiku biofüüsikaliste parameetrite sesoonne käik on minimaalne.

Eeldati, et valitud metsade heleduskordajate sesoonne käik fenoloogilises teljestikus on kõigis Landsati kanalites (välja arvatud TM6) piisavalt sile, et neid korrigeerimisel kasutada. Valitud metsade heleduse aegridadest pandi läbi sile kõver (olenevalt metsatüübist teise kuni neljanda astme polünoom) ja arvutati hälve tegelike heleduskordajate ja sileda kõvera vahel. Edasi arvutati igale pildile uued kaliibrimiskordajad (tõus ja vabaliige), nii et ruutkeskmise hälve siledast kõverast üle kaliibrimiseks valitud metsade oleks minimaalne. Valemid korrigeeritud kaliibrimiskordajate b_{ij} (seose tõus) ja a_{ij} (vabaliige) arvutamiseks olid järgmised:

$$b_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n DN_{ijk} R_{ijk}^{sm} - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n DN_{ijk} \sum_{k=1}^n R_{ijk}^{sm}}{\sum_{k=1}^n DN_{ijk}^2 - \frac{1}{n} (\sum_{k=1}^n DN_{ijk})^2} \quad (2)$$

$$a_{ij} = \sum_{k=1}^n R_{ijk}^{sm} - \frac{b_{ij}}{n} \sum_{k=1}^n DN_{ijk} \quad (3)$$

Siin:

DN_{ijk} - i -nda pildi j -nda kanali k -nda objekti keskmine heledus DN ühikutes,
 R_{ijk}^{sm} - i -nda pildi j -nda kanali k -nda objekti silutud heleduskordaja.

Saadud kaliibrimiskonstante kasutati ka teiste metsatüüpide aegridade silumisel.

MUDELARVUTUSED

Mudelarvutusteks kasutati Kuusk-Nilsoni metsa heleduse mudelit (Kuusk, Nilson 2000). Kuusk-Nilsoni metsa heleduse mudel võimaldab arvutada heleduskordajate väärtusi lainepikkuste vahemikus 400-2400 nm (nähtav kuni keskmine infrapunane spektriosa). Mudelile on vaja ette anda küllaltki suur arv sisendparameetreid. Nende hulgas on nii tüüpilisi metsataakseerimise parameetreid, nt puu kõrgus (m), rinnasdiameeter (cm), puistu tihedus (puude arv m² kohta), puurinde liigiline koosseis.

Lisaks sellele on teisigi vajalikke parameetreid, mida metsandusandmebaasides ei ole, näiteks võra kõrgus ja diameeter, ja taimelehtedes sisalduvate ainete (vesi, pigmendid) sisaldus ja suur hulk alustaimestiku parameetreid. Vajaliku informatsiooni puudumise tõttu olid nende parameetrite väärtused ja nende sesoonne käik hinnangulised, nende väärtusi muudeti nii, et saavutada satelliidipiltidelt saadule sarnanevat heleduskordajate käiku, püüdes samas jääda reaalsuse piiridesse.

Et täpsemalt jäljendada sensorite spektraalset tundlikkust ja arvestada optiliste omaduste muutumist satelliidiskanneri kanalite ulatuses, tehti arvutused iga Landsati kanali jaoks kolmel lainepikkusel – vastava kanali keskmisel ja minimaalsel ning maksimaalsel lainepikkusel. Saadud heleduskordaja väärtustest arvutati kaalutud keskmine, kus keskmise lainepikkuse heleduste väärtusele omistati kaal 0,5 ja kummalegi äärmisele lainepikkusele 0,25. Arvutused tehti kümnepäevase sammuga, alustades aasta algusest lugedes 120. päevast (30. aprill) ja lõpetades 250. päevaga (6. september). Iga päeva jaoks kasutati Päikese kõrguse väärtust, mis vastas Päikese kõrgusele Landsati ülendlennu ajal (umbes 9:10 Greenwichi aja (GMT) järgi) (lisa, tabel 3)(Nilson *et al.*, avaldamisel).

Mudelis on mets jagatud puude-, alustaimestiku- ja samblarindeks, millele lisandub veel kõige alumine, mulla- ja varisekiht. Puurindes on võimalik eristada mitut liigi- ja suurusklassi: näiteks esimene, vanemate puudega, ja teine, nooremate taimedega järelkasvurinne. Antud töö puhul kasutati seda võimalust hea kasvukoha kaasikute puhul, kus kaskedest koosneva suurusklassi alla lisati järelkasvurindena noori, ca 5 meetri kõrgusi kuuski. Ühe suurusklassi piires loetakse puud identseteks nii liigi, kõrguse, rinnasdiameetri, pigmentidesisalduse kui muude parameetrite poolest. Puude võra kuju iseloomustamiseks on võimalik kasutada erinevaid geomeetrilisi kujundeid – pöördellipsoidi, koonust või silindri otsa asetatud koonust. Käesolevas töös kasutati

lehtpuude võra modelleerimisel pöördellipsoidi ja okaspuude puhul silindri peale asetatud koonust; selle jaoks vajalikud andmed arvutati regressioonseostest metsandusandmebaasides toodud andmetega (Lang *et al.*, avaldamisel).

Lisas tabelis 4 on toodud mõnede olulisemate puu-, rohu- ja sambarinde parameetrite väärtused kevadel (120. päev), südasuvel (190. päev) ja hilissuvel (250. päev). Kaasikute puhul eeldati, et simulatsioonide alguspäeval, 30. aprillil (120. päev aasta algusest), lehti puudel pole ja heade kaasikute puhul alates umbes 130. päevast (9.mai) hakkavad nii lehtede kogukaal kui ka lehepinnaindeks (LAI) järjekindlalt suurenema. Selline lehtimise kiirus on kooskõlas ka EMHI Teadus- ja arenduskeskuse kliima osakonna Jõgeva töögrupi fenoloogiliste andmetega (Keppart 2007), mille kohaselt kaskede massiline lehtimine algab keskmiselt 6. mail (ca 50-aastase vaatlusperioodi keskmine). Kehvade kaasikute puhul algas massiline lehtimine veidi hiljem, mida võib märgata ka satelliidipiltidelt saadud aegreast. Lehtede hulk saavutab maksimumi umbes 190. päeval aasta algusest (8. juulil) ning kahanes uuesti hilissuvel. Sarnast lehepinnaindeksi käiku on täheldatud mitmete eri kliimavöötmete taimekoosluste juures (Maass 1995, Vose 1990).

Okaspuude puhul eeldati, et 120. päeval on puus kolme aasta okkad, neile lisati kevade edenedes (tavaliselt mai teises pooles) jooksva aasta okkad (ca ¼ okaste kogukaalust puu kohta kesksuvel). Sellist eeldust kinnitab ka Metsaseire 2005. aruanne, mille kohaselt ongi Eestis keskmise hariliku männi võras viimase 3-4 aasta jooksul kasvanud okkad (Metsaseire 2005.a. aruanne). Kuna hariliku kuuse puhul on erinevate aastate okaste visuaalne eristamine raskendatud, siis puuduvad ka vastavad metsaseire välitööde andmed.

Lehtede optiliste omaduste kirjeldamiseks on metsa heleduse mudelitesse integreeritud PROSPECT (Jacquemoud ja Baret 1990) ja LIBERTY (Dawson *et al* 1989) mudelid. Antud töös kasutati PROSPECT taimelehe optiliste omaduste mudelit, milles muutuvate suurustena kasutati lehtede/okaste vee- ja klorofüllisisaldust (antid protsendina lehe pindtihedusest – SLW) ning vajadusel lehe paksust. Viimast iseloomustati lehe pinnaühiku kaalu (LWA) abil. Lisaks neile kahele komponendile sisaldas PROSPECTi mudel veel kuivainet (*'drymatter'*) ja nn pruuni pigmenti (*'brown pigment'*), kuid nende kontsentratsioonide varieerimine heleduse väärtustele olulist mõju ei avaldanud.

Lehtpuude puhul kasvatati klorofüllü kontsentratsiooni lehes kevadest kuni südasuveni, hilissuvine klorofüllü kontsentratsioon oli natuke madalam. Hea

kasvukoha kaasikute lehtede klorofüllisisaldus eeldati olevat natuke kõrgem kui kehva kasvukoha kaasikute oma. Lehtede veesisaldus loeti kevadest kuni südasuveni konstantseks, 250. päeval seda natuke vähendati.

Okaspuude puhul vähendati jooksva aasta okaste lisamise hetkel klorofüllisisaldust okastes - eeldades, et algselt on noortes okastes vähem klorofüllit, mis omakorda mõjutaks ka kogu puu okaste keskmist klorofüllisisaldust. Ülejäänud kasvusesooni jooksul okaste hulka puu kohta ei muudetud, okaste klorofüllisisaldust kehvade kasvukohtade metsades (kehvad männikud ja rabamännikud) ei muudetud, hea kasvukoha männikute ja kuusikute puhul eeldati, et okaste klorofüllisisaldus on maksimaalne südasuvel. Nagu kaasikute puhulgi, oli heade kasvukohtade metsades (hea kasvukoha männikud, kuusikud) kasvavate puude okastes klorofüllit kogu kasvusesooni jooksul rohkem kui kehvamate kasvukohtade metsades, kusjuures kõige madalamad olid klorofüllit kontsentratsioonid rabas kasvavate mändide okastes. Võib arvata, et kehvade kasvukohtade metsades on puud kas liigniiskusest või muudest teguritest tingituna stressiseisundis, stressi all kannatavate taimede lehtedes ja okastes on aga klorofüllisisaldus sageli madalam kui paremate kasvukohtade taimedes (Sims, Gamon 2002). Okaste veesisaldus hilisügisel oli enamasti kõrgem kui kesksuvel (v.a. rabamännikutes, kus veesisaldus okastes jäi kesksuvisele tasemele).

Alustaimestik koosnes kahest – rohu- ja puhmarindest ja samblarindest, nende all oli varise- ja mullakiht. Alustaimestiku parameetrite väärtused olid hinnangulised. Eeldati, et rohurinde lehepinnaindeks kasvab kevadest kesksuveni ja kahaneb taas suve lõpupoole. Sama kehtib ka klorofüllit ja vee sisalduse kohta – eeldati, et 120. päeval on rohurindes valdavalt eelmise aasta taimede kuivanud varred ja lehed ning mõned kiirema arenguga noored taimed, millest tulenevalt on rohurindes tervikuna keskmine klorofüllit- ja veesisaldus madalad. Heade kasvukohtade metsades oli klorofüllisisalduse tõus kevadise olukorraga võrreldes suurem.

Samblarinde lehepinnaindeks ning klorofüllisisaldus loeti kasvuhooaja jooksul praktiliselt konstantseteks, veesisaldus loeti mõnede metsatüüpide puhul (kehvad kaasikud) kevadel kõrgemaks kui suvel, et jäljendada Järvelja metsades sageli esinevat liigveeperioodi. Rabamännikutes lisati turbasammalde punaka värvuse saamiseks samblarindesse luteiini (karotinoid; ca 0,2 % SLW-st) .

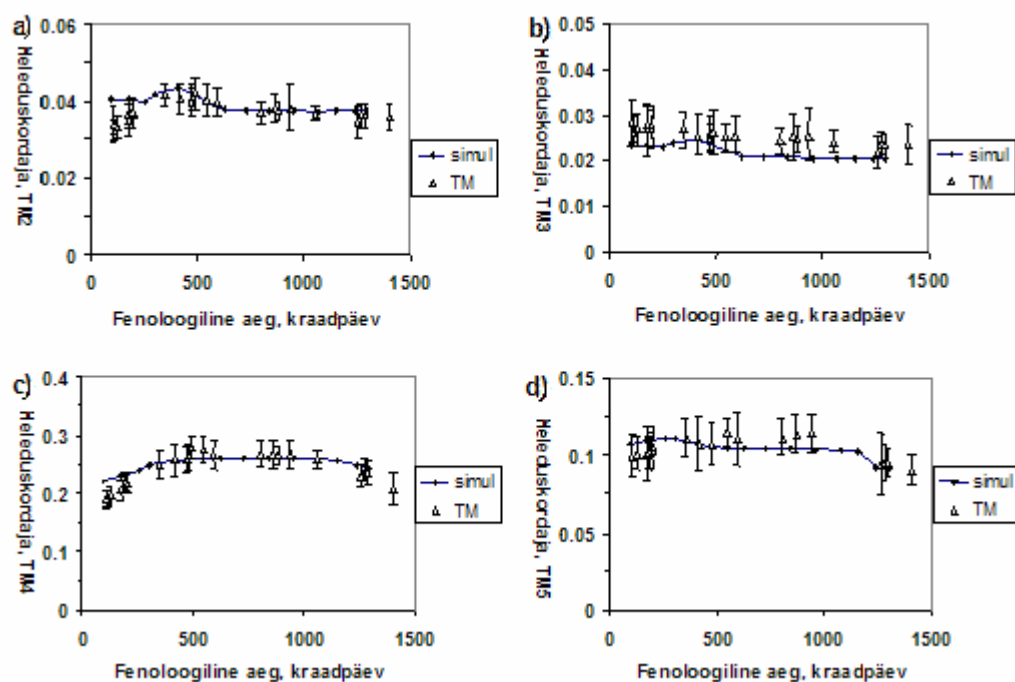
Hilisemate katsetuste käigus lisati hea ja kehva kasvukoha kaasikute puu-, rohu- ja samblarinde lehtedesse samuti luteiini, et realistlikumalt matkida lehtedes olevate pigmentide komplekti – karotinoidid on klorofüllit kõrval üks olulisemaid pigmentide

gruppe. Seda tehti suhtes 1 ühik luteiini 4 ühiku klorofüllü kohta, mis on hinnanguliselt keskmine klorofüllü-karotinoidide suhe taimede lehtedes/okastes (Demmig-Adams 1998, Marschall ja Proctor 2004, Mandre ja Tuulmets 1997).

TULEMUSED

1. Kuusikud

Joonisel 4 on toodud kuusikute satelliidipiltidelt mõõdetud (üksikud punktid) ja mudelist saadud heleduskordajate käigud erinevates Landsat TM kanalites. Kuna tegemist on suure võrastiku liitusega igihalja metsatüübiga, ei ole kuusikute heleduskordajate väärtustes märgata erilist sesoonset käiku, ka mudelarvutustes muudeti parameetrite väärtusi kasvuhooaja jooksul suhteliselt vähe.

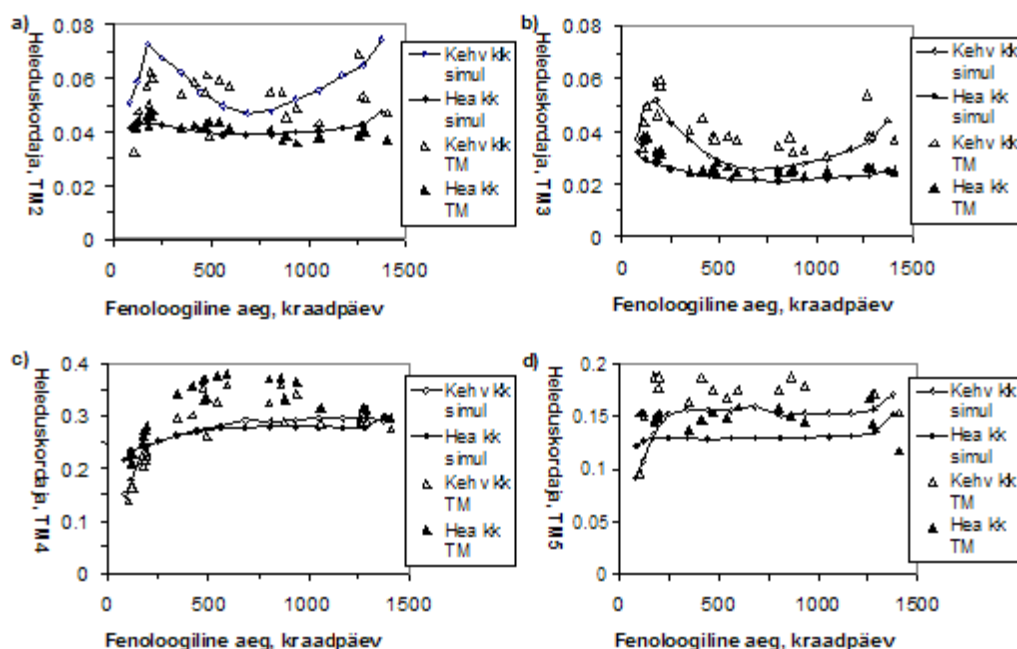


Joonis 4. Kuusikute heleduskordajate mudelist (pideva joonega) ja sat. piltidelt (üksikud sümbolid) sesoonseid käigud Landsat TM2 - TM5 kanalites.

Üldiselt oli kokkulangevus mudeli ja satelliidipiltide vahel rahuldav (lisa, tabel 5), enam probleeme oli sinise (TM1) ja keskmise infrapunase kanaliga (TM7). Küllaltki keeruline oli simuleerida satelliidipiltidelt saaduga sarnanevaid sesoonseid käike, seda eriti nähtavas spektriosas. Kasutatud biokeemiliste parameetrite komplekt ei võimaldanud kuigi hästi modelleerida sinise, roheline ja punase kanali erinevat käitumist varakevadel, mil heleduskordajate väärtus kasvas sinises ja rohelises kanalis, ent jäi samaks või isegi kahanes punases lainealas.

2. Kaasikud

Joonisel 5 on toodud hea (täidetud sümbolid) ja kehva kasvukoha (seest tühjad sümbolid) kaasikute heledusekordajad satelliidipiltidelt (üksikud sümbolid) ja mudelist (jooned).



Joonis 5. Hea (täidetud sümbolid) ja kehva (seest tühjad sümbolid) kasvukohtade kaasikute heleduskordajate sesoonsed käigu mudelist (joon) ja sat. piltidelt (üksikud sümbolid), kanalid TM2-TM5.

Piltidelt saadud aegridadest on näha, et kehva kasvukoha kaasikud on üldiselt headest kaasikutest heledamad kõigis kanalites peale lähisinfrapunase, TM4 kanali. Samuti võib märgata, et varakevadel on kehvad kaasikud tumedamad ning nende heleduskordaja väärtus kasvab küllaltki lühikese aja jooksul märgatavalt. Võimalik, et kehvad kaasikud kannatavad kevaditi liigvee all ning enne lehtede arengut peab muld kõigepealt kuivama. Sarnast efekti aga pole märgata heade kaasikute aegreas. Kaselehtede sügisese kolletumisest tulenevat heleduskordajate muutumist pole piltidelt näha. Võimalik, et augusti teises pooles (viimane pilt on 29. augustist) pole klorofüllü kontsentratsioon veel piisavalt madalale langenud, et kollast värvust põhjustavad karotinoidid lehtede värvi olulisel määral mõjutaksid.

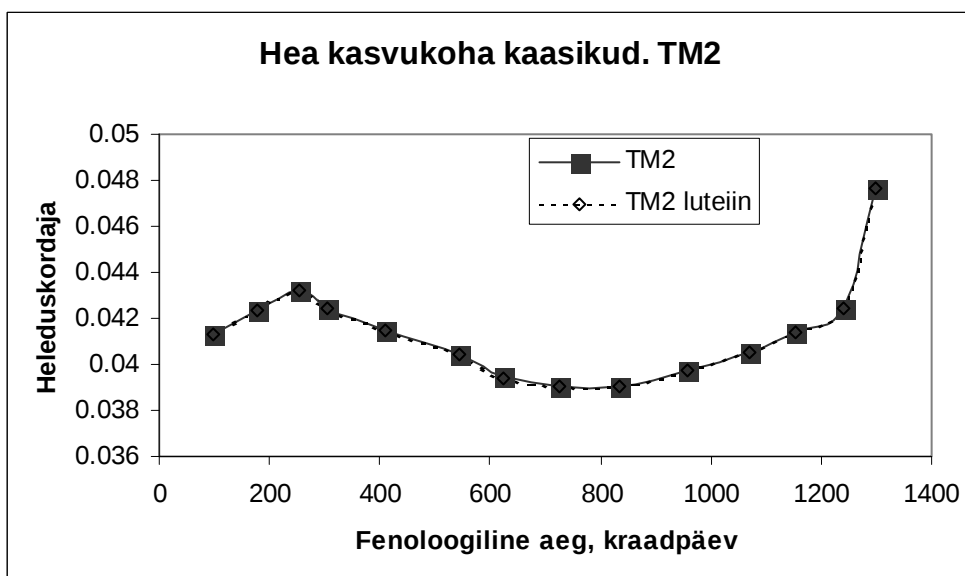
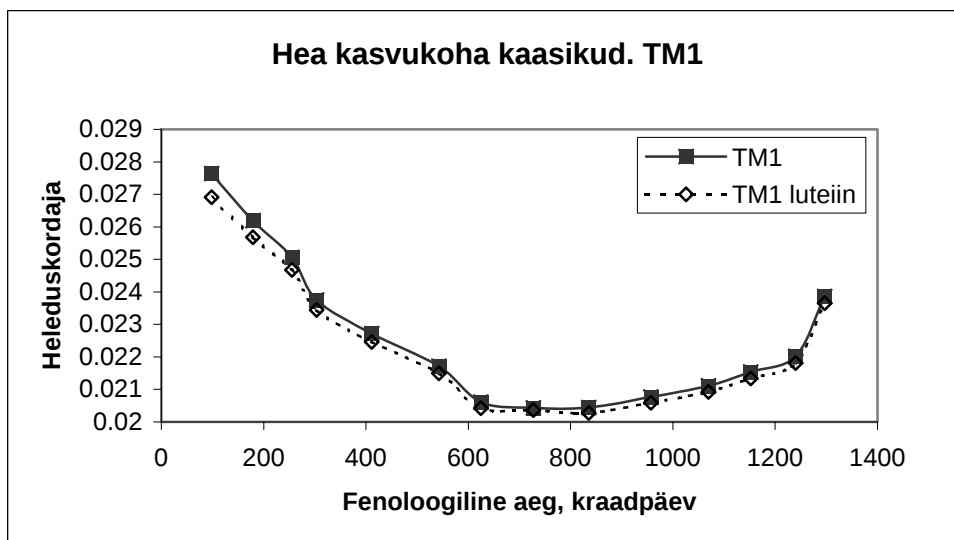
Mudeli abil oli võimalik jäljendada põhilisi sesooni jooksul toimuvaid muutusi heledusekordajate väärtustes, ent kokkulangevus mudeli ja satelliidipiltide heleduskordajate arvuliste väärtuste vahel oli küllalt madal (lisa, tabel 5). Enamikes kanalites polnud hea ja kehva kasvukoha kaasikute vaheline erinevus mudeli põhjal

nii suur kui satelliidipiltidel. Eriti TM4 kanalis olid nende kahe kasvukoha kaasikute heleduskordajad suhteliselt sarnased, kui välja arvata lühike periood varakevadel; hea kasvukoha kaasikute puhul olid mudelist saadud heleduskordajad järjekindlalt madalamad kui satelliidipiltidelt mõõdetud. Mudelist saadud aegreas võib näha klorofüllü kontsentratsiooni langusest tingitud heleduskordajate väärtuste kasvu nähtavas spektriosas suve lõpupoole; samas on satelliidipiltidelt saadud aegrea käik pigem vastupidine. Keskmises infrapunases TM5 kanalis on mudeli heleduskordajate väärtused püsivalt kõrgemad satelliidipiltide aegrea heleduskordajate väärtustest.

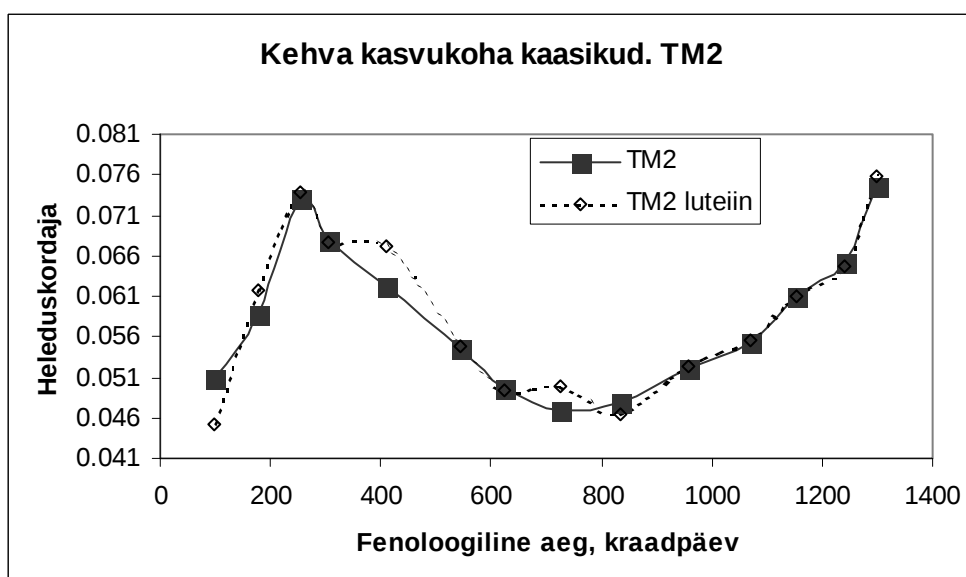
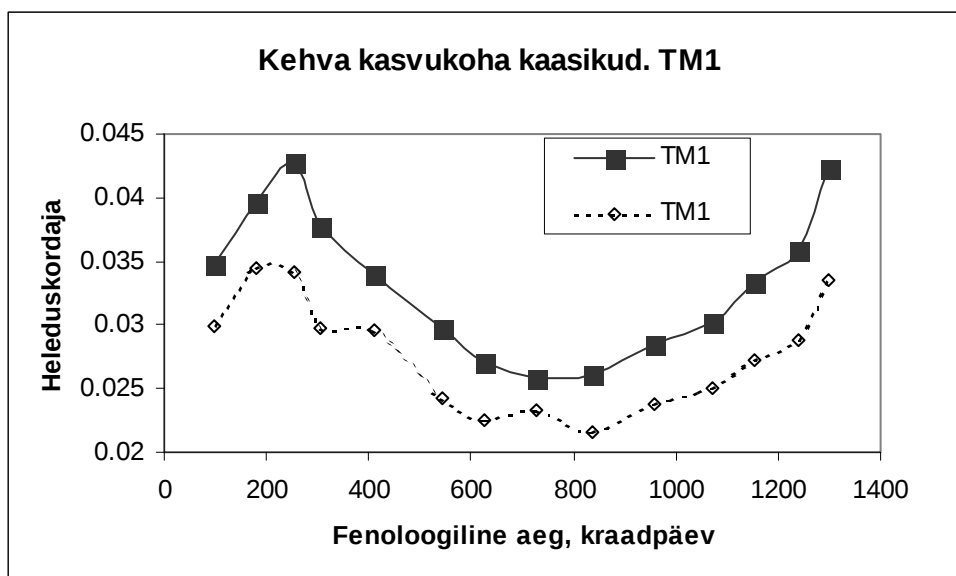
2.1. Luteiini lisamine lehtedesse

Joonistel 6 ja 7 on toodud mudelist arvutatud, vastavalt hea ja kehva kasvukoha kaasikute luteiiniga (seest tühjad sümbolid) ja luteiinita (seest täidetud sümbolid) aegride võrdlus. Et rõhutada heleduskordajate väärtuste erinevusi kahe aegrea vahel, on y-telje (heleduskordaja) nullpunkti joonistel nihutatud. Luteiini lisamine kaasikute puu-, rohu- ja samblarinde lehtedesse mõjutas hea kasvukoha kaasikute saadud heleduskordajate väärtusi suhteliselt vähe, erinevust oli praktiliselt märgata vaid sinises kanalis (TM1), kus heleduskordajate väärtused küll langesid, ent vähem kui 0,001 ühiku võrra (ca 2,6% ilma luteiiniga aegrea heleduskordaja väärtusest).

Kehva kasvukoha kaasikutes oli erinevus luteiiniga ja luteiiniga aegride vahel mõnevõrra suurem – heleduskordajate väärtused erinesid sinises kanalis kuni 0,009 ühiku võrra (mis oli ca 20% esialgsest heleduskordaja väärtusest). Nagu hea kasvukoha kaasikuteski, toimus nihe heleduskordaja väärtuste vähenemise suunas. Rohelises TM2 kanalis heleduskordajate väärtused luteiiniga ja luteiiniga aegride vahel küll erinesid, ent süstemaatilist nihet kõrgemate või madalamate väärtuste poole ei täheldatud.



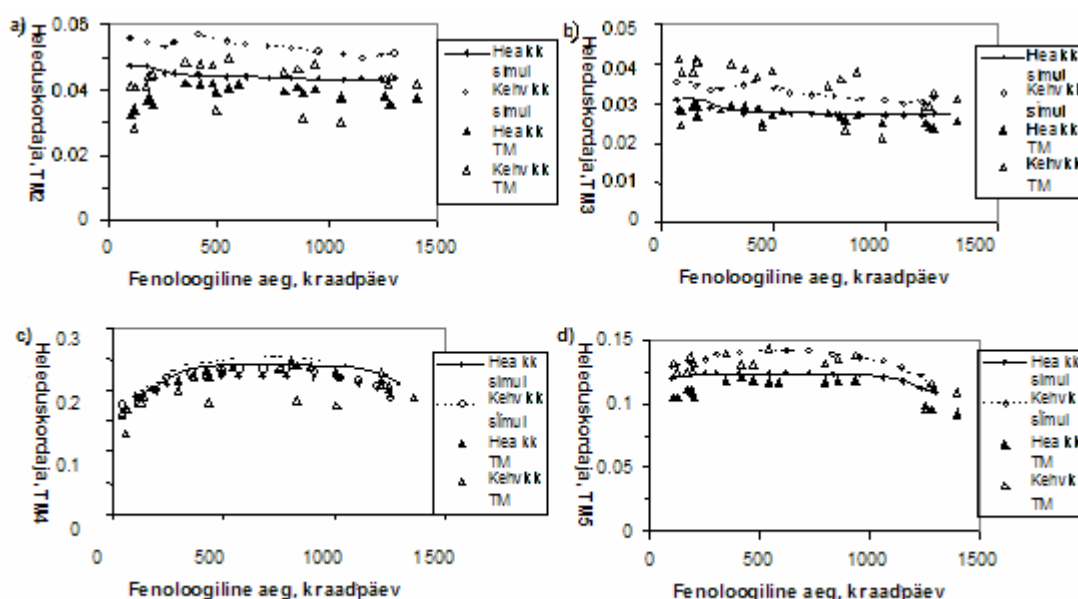
Joonis 6. Hea kasvukoha kaasikute heleduskordajate võrdlus luteiiniga ('TM1', 'TM2', täidetud sümbolid) ja luteiiniga ('TM1 lutein', 'TM2 lutein', seest tühjad sümbolid) situatsioonis.



Joonis 7. Kehva kasvukoha kaasikute heleduskordajate võrdlus luteiinita ('TM1', 'TM2', täidetud sümbolid) ja luteiniga ('TM1 lutein', 'TM2 lutein', seest tühjad sümbolid) situatsioonis.

3. Männikud

Nagu kuusikute puhul, nii ei muutu ka männikute heleduskordaja väärtused sesooni vältel kuigivõrd; selle põhjuseks võib olla, et Päikese kõrguse sesoonne käik ja alustaimestiku LAI ning klorofüllisisalduse muutumine kompenseerivad osaliselt teineteist. Kehva kasvukoha männikud olid hea kasvukoha metsadest kõigis kanalites peale TM4 heledamad (sama kehtis ka kaasikute kohta).



Joonis 8. Hea (täidetud sümbolid) ja kehva kasvukoha männikute mudelist (joon) ja sat.piltidelt (üksikud sümbolid) saadud heleduskordajate sesoonnsed käigud kanalites TM2 - TM5.

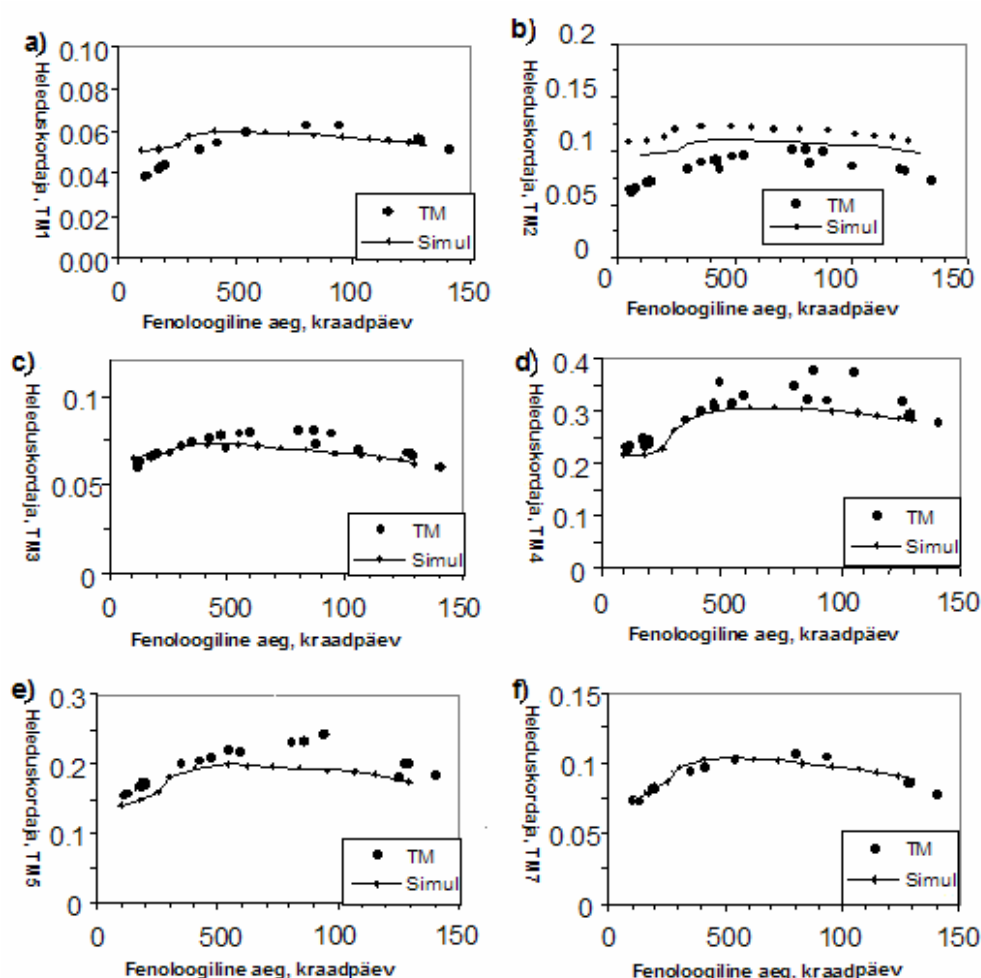
Kokkulangevus mudeli ja satelliidipiltide andmete vahel varieerus olenevalt kanalist heast kehvani (lisa, tabel 5). Männikute heleduskordajate sesoonsed käigud on toodud joonisel 8; seest tühjade sümbolitega on märgitud kehvade kasvukohtade männikud, seest täidetud sümbolitega heade kasvukohtade männikud. Nähtavas lainelas langesid mudeli ja satelliidipiltide aegread küllaltki rahuldavalt kokku; siiski olid rohelistes kanalites mudeli poolt ennustatud heleduskordajate väärtused mõnevõrra kõrgemad kui satelliidipiltide omad; punases kanalites olid kehva kasvukoha männikute mudelist saadud heleduskordajad seevastu satelliidipiltide väärtustest järjekindlalt madalamad.

Samuti pole mudel suutnud tabada heleduskordajate väärtuste kasvu nähtavas lainelas varakevadel. Lähisinfrapunase lainela (NIR; TM4) heleduskordajate kumer

sesoonne käik on ka mudelist hästi välja tulnud. Väikest heleduskordajate väärtuste erinevust hea ja kehva kasvukoha männikute vahel võib näha nii satelliidipiltidelt kui mudelist saadud aegridades. Ka keskmises infrapunases lainelas, Landsat TM5 kanalis, langevad mõlemad aegread küllaltki hästi kokku, kui välja arvata hea kasvukoha männikute liiga kõrge keskmine heledus mudeli aegreas. Samas hindab mudel samuti keskmises infrapunases asuva TM7 kanalis heleduskordajate väärtusi üle nii hea kui kehva kasvukoha männikute puhul.

4. Rabamännikud

Joonisel 9 on toodud rabamännikute heleduskordajate sesoonsed käigud. Rabamännikute puhul paistab üheks väga oluliseks teguriks olevat Päikese kõrguse sesoonne käik, mis põhjendab ära suure osa heleduskordajate muutumisest kasvusesooni jooksul. Mida kõrgemal on Päike, seda suuremad olid ka heleduskordajate väärtused.



Joonis 9. Rabamännikute mudelist (joon) ja sat. piltidelt (üksikud sümbolid) saadud heleduskordajate sesoonsed käigud kanalites TM1 - TM7.

Samas ei õnnestunud mudelis Päikese kõrgust ja veel teatud parameetreid muutes edukalt matkida satelliidipiltidelt pärit heleduskordajate käiku, seega peavad rabamännikute heleduskordajate väärtuste muutumist kasvuhooaja jooksul mõjutama veel mõned, seni veel teadmata lisategurid.

Mudeli abil saadud sesoonsed käigud olid nõrgemalt väljendunud kui satelliidipiltide aegreas, heleduse väärtuste kokkulangevus oli vastuvõetav – kui välja arvata roheline kanal. Liiga suuri heleduse väärtusi rohelises kanalis võib seletada sellega, et (eriti samblarinde) lehtede pigmentide sisaldus ei vastanud tegelikkusele. Samas oli liiga kõrgeid heleduse väärtusi rohelises kanalis märgata ka teiste männikute juures, mis võib viidata kasutatud klorofüllü neeldumisspektri sobimatusele männiokaste optiliste omaduste kirjeldamisel. Punases kanalis oli mudeli ja satelliidipiltide kokkulangevus küllaltki hea, nagu ka keskmise infrapunase lainelas TM7 kanalis. Seevastu aga lähiinfrapunases TM4 ja keskmises infrapunases TM5 kanalis olid mudeli heleduse väärtused mõnevõrra madalamad satelliidipiltide heleduse väärtustest.

DISKUSSIOON

Metsa heleduse mudelist saadud aegridade reaalsusele vastavuse hindamiseks võrreldi metsa heleduskordajate väärtusi ja nende sesoonset käiku eri lainepikkuste vahemikus satelliidipiltidelt mõõdetud heleduskordajate väärtuste ja sesoonsete käikudega, eeldades et viimased kujutavad tõepäraselt vastavate metsatüüpide heleduskordajate väärtuste käitumist. Siiski võib mudeli ja satelliidipiltide aegridade vahelistel erinevustel olla ka satelliidipiltide ajalisest katvusest ja piltide töötlemisel ja aegridade koostamisel kasutatud võtetest tingitud põhjusi.

Nii näiteks selgus, et kui atmosfääriaerosooli optilist paksust satelliidipiltide atmosfäärikorreksioonil süstemaatiliselt alahinnata, siis võib heleduskordajatest moodustatud aegreas tekkida suurema amplituudiga sesoonsed muutused, kui nad tegelikult on. Pole välistatud, et meie kasutada olevas piltide aegreas on mõned ilmingud, näiteks seletamata jäänud osa heleduskordajate sesoonsest käigust rabamännikutel, seotud just piltide atmosfäärikorreksiooni probleemidest tingitud efektidega.

Praegused aegread ei ulatu kuigi kaugemale sügisesse, mistõttu võivad leidmata jääda mõned metsade heleduskordajate aegreas kasvusesooni lõpupoole ilmnevad nähtused - näiteks kas hea ja kehva kasvukoha kaasikud kolletuvad sügise saabudes üheaegselt? Või kas esineb sügisel kehvade kaasikute aegreas varakevadega sarnanev liigniiske periood, mis võiks väljenduda metsa heleduskordajate väärtuste kiires languses?

Kuna suure pilviste päevade esinemistiheduse tõttu on keeruline, et mitte praktiliselt võimatu saada ühest aastast pärinevate piltide aegrida, tekib küsimus ka selles, kui täielikult on üldse võimalik välja taandada erinevate aastate ilmastikutingimuste mõju metsakooslusse kuuluvate taimede arenemise kiirusele. Antud töös kasutati erinevuste vähendamiseks fenoloogilise aja teljestikku, ent kas lisaks temperatuurile on veel mõni meteoroloogiline faktor (nt sademete hulk), mis olulisel määral mõjutab taimede arengut? Ka on kirjanduses fenoloogilise aja kasutatavuse kohta erinevate aastate meteotingimuste erinevuste kõrvaldamiseks vastukäivaid arvamusi.

Lisaks sellele, et kasutatud pildid olid pärit erinevatest aastatest, olid need tehtud ka erinevatel satelliitidel olevate skanneritega. Landsati ja SPOTi puhul on aga teatud erinevusi nii ülelennu ajas kui ka ühe kanali (nt roheline Landsat TM2 ja SPOT XS1) lainepikkuste vahemikus. Simulatsioonidest aga selgus, et Päikese kõrgus võib

olenevalt metsatüübist olla üks olulisemaid heleduse sesoonset käiku mõjutavaid tegureid.

Diskuteerida võib ka aegridade koostamisel metsandusandmebaasidest tehtud päringutel seatud kriteeriumide üle. Praegune vähemalt ühe hektarilise pindala piirang on kompromiss servapikslite analüüsi kaasamise ja valimi suuruse vahel. Landsati ja SPOTi pikslid on võrreldes Järvelja metsaeraldistega küllalt suured – peaaegu pooled Järvelja metsatükid on väiksemad kui 1 ha ja suurema pindalaga eraldisi on eriti hea kasvukoha metsade hulgas vähe. Seega on valitud kesktee “metsapikslite” puhtuse ja analüüsi kaasatavate pikslite koguhulga vahel - kui minimaalne eraldise pindala võtta liiga suur, on servapikslite osakaal analüüsis küll madalam, ent keskmise heleduskordaja väärtuse leidmisel arvestatavate pikslite hulk liiga väike ning ka sel viisil leitud heleduskordaja väärtused ja järelikult ka selliste andmete põhjal koostatud aegread pole kuigi usaldusväärsed. Servapikslitel ja metsade naabrusel on kindlasti mõju tulemustele – tumedate metsade keskmine heledus hinnatakse üle ja heledate metsade oma alla. Siiski ei tohiks neil olla suurt süstemaatilist mõju heleduskordajate sesoonse käigu kujule. Edaspidi tasub ilmselt kaaluda võimalust jätta servapikslid üldse analüüsist välja.

Mudelarvutused

Sesoonsete käikude modelleerimisel oli esimeseks probleemiks eri metsatüüpide vaheliste erinevuste täpne kujutamine sesooni olulistel hetkedel – kevadel, südasuvel ja hilissuvel. Kuigi käesoleva katse võib lugeda küllaltki õnnestunuks, esines ka mitmeid probleeme. Kuigi heleduse sesoonne käik mingis kanalis võis olla kvalitatiivselt õige, erinesid mudeliga arvutatud heleduse väärtused märgatavalt satelliidipiltidelt saadud heleduse väärtustest. Näiteks võiks tuua praktiliselt kõigi metsatüüpide juures märgatavad liiga suured heleduskordaja väärtused rohelises ja liiga madalad väärtused lähiinfrapunases kanalis, mis võivad olla põhjustatud näiteks sellest, et puudus mõni oluline heleduskordajate väärtusi mõjutav parameeter (nt karotinoidid) või oli mõne simulatsioonis kasutatud parameetri väärtus vale.

Mitmete parameetrite väärtuste ja sesoonse käigu kohta ei olnud infot ja nii tuli need mudelisse anda nn eksperthinnanguna või leida sobiv väärtuste komplekt mudelist saadud heleduse väärtusi piltidelt mõõdetutega sobitades. Näiteks eeldati vajaliku heleduse vähenemise saavutamiseks mudelarvutustes, et veesisaldus lehtedes tõuseb varakevadel ja suve lõpupoole. Selline veesisalduse kasv võib aset leida

samblarindes, kuid pole kindlaid tõendeid, et sama kehtib ka puu- ja rohurinde lehtede kohta. Samuti ei õnnestunud leida vajalikku informatsiooni näiteks lehepinnaindeksi väärtuste kohta erinevatel kasvuhooaja momentidel, või lehtedes sisalduvate ainete komplekti kohta käivat teavet (olulisemate pigmentide kontsentratsioonid ning nende muutumine ajas; muude olulisel määral lehe optilisi omadusi mõjutavate ainete sisaldus). Lisaks eeldab uute ainete (karotinoidide vmt) sissetoomine PROSPECTi mudelisse, et teada on ka nende neeldumisspektrid. Praegusel juhul oli karotinoididest olemas ainult luteiini neeldumisspekter, mille lisamine lehe koosseisu aga lõpptulemust oluliselt ei parandanud – kuigi võiks eeldada, et oranzhikat kuni punast tooni karotinoidide lisamine vähendab heleduskordajate väärtust eelkõige just rohelises kanalis, oli luteiini mõju märgata pigem TM1, sinises kanalis. See oli ka praktiliselt ainsaks erinevuseks luteiiniga ja luteiini mittesisaldavate aegridade vahel. Seda võib seletada fakt, et luteiin suuremates kontsentratsioonides on küll oranzikas, ent madalamates kontsentratsioonides pigem kollakat tooni. Luteiini lisamise erinevat mõju hea ja kehva kasvukoha kaasikute heleduskordajate väärtustele võiks ehk seletada hea kasvukoha kaskede lehtede kõrgema klorofüllisisaldusega, mis varjutab luteiini mõju.

Samuti ei võimalda mudeli enda ülesehitus tema praegusel kujul kuigi paindlikult katsetada erinevaid looduses mõeldavaid stsenaariume, näiteks mulla- ja varisekihi niiskuse muutumist kasvuhooaja jooksul, lehtede kolletumist ja langemist, kevadist niisketest kuivanud rohttaimede jäänustest koosnevat kulukihti jne.

Siiski võib tehtud simulatsioonidest välja tuua mõned olulisemad metsade heleduse sesoonset käiku mõjutavad tegurid, näiteks puurinde ja alustaimestiku LAI, puulehtede/okaste ning alustaimestiku vee- ja klorofüllisisaldus ja maapinna (mulla- ja varisekihi) heledus, mis eeldatavasti muutus koos mullaniiskuse muutumisega. Mudeli abil sai ka hinnata alustaimestiku osatähtsust metsa heleduskordaja sesoonses muutumises - alustaimestikus toimuvad sesoonsed muutused olid olulisemad väiksema liitusega metsade korral.

Eriti hõredamates kooslustes mõjutas heledust Päikese kõrguse muutumine sesooni jooksul, mis tavaliselt andis sesoonsele käigule kumera, kellukese kuju. Sarnasel viisil mõjutas heledust ka mullaniiskuse muutumine sesooni jooksul.

Lehepinnaindeksi tüüpiline muutumine sesooni jooksul andis nähtavas spektriosas tulemuseks kumera käigu, ent lähi- ja keskmises infrapunases lainelas võis kõver olla

kas kumer või nõgus, olenevalt võrastiku liitusest ja alustaimestiku ja mulla heledusest võrreldes puurinde heledusega.

Puurinde lehepinnaindeksi ja biokeemiliste parameetrite muutumise käik mõjutasid heledust enam kui muutused alustaimestikus. Nende mõju oli väiksem hõredamates kooslustes või okaspuumetsades, kus sesoonsed muutused puurindes on väiksemad.

Kokkuvõtteks võiks mainida, et kuigi mudelarvutustes ei õnnestunud täpselt korrata satelliidipiltidelt saadud heleduskordajate väärtuste muutumist kasvusesooni vältel, võiks tulemustega siiski rahule jääda – enamasti õnnestus matkida sesoonsete käikude üldist iseloomu ja selgusid ka mõned olulisemad heleduskordajate väärtusi mõjutavad faktorid. Saadud tulemuste parandamiseks on edaspidi plaanis täpsemalt arvestada taimelehtede biokeemilist koostist, tuues sisse rohkem aineid ning otsides infot uute ja olemasolevate parameetrite väärtuste muutumise kohta kasvusesooni jooksul (klorofüll-, vee- ja karotinoididesisaldus, LAI jne) ja piki boniteedi gradienti, kasutades sealjuures paremini ära ka olemasolevaid fenoloogilisi andmeid.

KOKKUVÕTE

Käesolevas töös üritati modelarvutuste abil matkida erinevate Eesti metsatüüpide heleduskordajate muutumist kasvusesooni vältel ja nende arvutuste põhjal välja selgitada olulisemaid heleduskordaja väärtusi mõjutavaid tegureid.

Arvutustes kasutati Kuusk-Nilsoni metsa heleduse mudelit ning arvutusi tehti kuue metsatüübi kohta: kuusikud, rabamännikud, hea ja kehva kasvukoha kaasikud ning hea ja kehva kasvukoha männikud, millele arvutati kümnapäevase sammuga heleduskordajate väärtused Landsat TM kanalitele TM1-5 ja TM7 vastavates lainepikkuste vahemikes. Arvutustes vajalike parameetrite väärtused leiti metsanduslikest andmebaasidest või hinnanguliselt.

Saadud aegridu võrreldi satelliidipiltidelt saadud aegridadega, mis olid pärit Järvelja ala kohta käivatelt satelliidipiltidelt (aastatest 1986-2003). Piltidele oli eelnevalt tehtud atmosfäärikorrektsioon. Programmi PixelWin kasutades olid arvutatud eri metsatüüpidele vastavate pikslite keskmised heleduskordajate väärtused iga pildi kohta ning nende põhjal koostatud aegridadele oli rakendatud silumist.

Kuigi enamasti õnnestus saavutada satelliidipiltidelt saadutega sarnaseid heleduskordajate sesooneid käike, oli siiski keeruline saada kokkulangevust heleduskordajate numbriliste väärtuste vahel. Enamike metsatüüpide puhul olid roheline kanali heleduskordajate mudelist saadud väärtused kõrgemad kui satelliidipiltidelt, kuigi sesooned käigud võisid kuju poolest sarnased olla. Selliste erinevuste põhjuseks võivad olla näiteks vajakajajäämised teadmistes lehtede biokeemia kohta või mudeli või kasutatud neeldumisspektrite puudused.

Olulisemateks metsa heleduskordajaid mõjutavateks teguriteks osutusid Päikese kõrgus, puurinde ning alustaimestiku ja samblarinde LAI ning vee- ja klorofüllisisaldus.

SUMMARY

The seasonal reflectance course of some forest types of Estonia from simulation and satellite images

In this study, the Kuusk-Nilson forest reflectance model was used to simulate the seasonal courses of reflectance of some forest types in Estonia and to find some of the driving factors behind these seasonal courses.

Six forest types were included: spruce-dominated forests, pine-dominated forests growing on fertile soil and pine-dominated forests growing on infertile soil, birch-dominated forests on fertile soil, birch-dominated forests growing on infertile soil, and Pinus bogs. The values of reflectance were calculated with a time step of 10 days, at wavelengths corresponding to Landsat TM sensor bands TM1-TM5 and TM7. The parameter values used in simulations were either taken from forestry databases when possible, or guessed in order to obtain the necessary reflectance factor values.

These time series were compared to time series formed from a set of satellite images taken over the Järvselja region in the years 1986-2003. Previously, the images had been atmospherically corrected, and seasonal curves of reflectance factors for the forests under study had been calculated from corresponding pixels that had been extracted from the images using the PixelWin program. Since the resulting time series were rather scattered, a smoothing procedure was applied.

Although it was possible to obtain seasonal courses similar to those calculated from the satellite images, it was more difficult to match the numerical values. For example, even though the model was usually able to reproduce the shape of the seasonal course of reflectance in the TM4 band, the actual value of reflectance was systematically overestimated.

Among some of the more important factors that influence the seasonal course of reflectance were the seasonal changes in Sun angle, and changes in both the tree and understorey LAI and chlorophyll and water concentration.

KASUTATUD KIRJANDUS

- Dawson, T. P., Curran, P. J., Plummer, S. E. (1998) "LIBERTY: modelling the effects of leaf biochemistry on reflectance spectra," *Remote Sensing of Environment* **65**, 50-60.
- Demmig-Adams, B. (1998) "Survey of Thermal Energy Dissipation and Pigment Composition in Sun and Shade Leaves," *Plant Cell Physiol.* **39**(5), 474-482
- Jacquemoud, J., Baret, F. (1990) "PROSPECT: a model for leaf optical properties spectra," *Remote Sensing of Environment.* **34**, 75-91
- Keppart, L. (2007) EMHI Teadus ja arenduskeskuse kliima osakonna Jõgeva töögrupp; Jõgeva Sordiareetuse Instituut (pers. kirjavahetus)
- Kuusk, A., Nilson, T. (2000) "A Directional Multispectral Forest Reflectance Model." *Remote Sensing of Environment* **72**, 244-252
- Landsat 5 ja Landsat 7 skannerite tehnilised andmed:
http://www.ga.gov.au/acres/prod_ser/landdata.jsp. Viimati külastatud: 13.05.2007
- Lang, M, Nilson, T., Kuusk, A., Kiviste, A., Hordo, M. "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*, avaldamiseks vastu võetud.
- Lükk, T. (1999) "Satelliidipiltide heleduste arvutamine PixelWin programmiga," *Pidev metsakorraldus*, EPMÜ Metsandusteaduskonna toimetised, **32**, 88-95
- Maass, J. M., Vose, J. M., Swank, W. T., Martinez-Yrizar, A. (1995) "Seasonal changes of leaf area index (LAI) in a tropical deciduous forest in west Mexico," *Forest Ecology and Management* **74**, 171-180
- Mandre, M., Tuulmets, L. (1997) "Pigment changes in Norway spruce induced by dust pollution," *Water, air and soil pollution* **94** (3-4), 247-258
- Marschall, M., Proctor, M.F. (2004) "Are Bryophytes Shade Plants? Photosynthetic Light Responses and Proportions of Chlorophyll *a*, Chlorophyll *b* and Total Carotenoids," *Annals of Botany* **94**, 593–603
- Nilson, T., Kuusk, A., Lang, M., Lükk, T. (2003) "Forest Reflectance Modeling: Theoretical Aspects and Applications," *Ambio* **32** (8), 535-541

Nilson, T., Lükk, T., Suviste., S., Kadarik, H., Eenmäe, A.(2007) “Calibration of time series of satellite images to study the seasonal course of reflectance” kogumikus *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Biology. Ecology.* A. Reinart (toim.) **56** (1), 5-18

Nilson, T., Suviste, S., Lükk, T., Eenmäe, A. “Seasonal reflectance course of some forest types in Estonia from a series of Landsat TM and SPOT images and via simulation,” *International Journal of Remote Sensing*, avaldamiseks vastu võetud.

Sims, D.A., Gamon, D.A. (2002) “Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages,” *Remote Sensing of Environment* **81**, 337– 354

SPOT satelliidi tehnilised andmed

http://www.spot.com/html/SICORP/_401_444_445_.php. Viimati külastatud 07.05.2007

Terasmaa, T. (koostaja) Riiklik keskkonnaseire alamprogramm 7. Metsaseire. 2005.a. aruanne. Metsakaitse- ja metsauuenduskeskus. Tartu 2006.

http://metsad.ee/aruanded/200602_metsaseire%202005.pdf. Viimati külastatud 13.07.2007

Vermote, E. F., Tanre, D., Deuze, J.L., Herman, M., Morcrette J.J. (1997) “Second simulation of satellite signal in the solar spectrum, 6S – An overview,” *IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing* **35**, 675-686.

Vose, J. M., Swank, W. T. (1990) “Assessing seasonal leaf area dynamics and vertical leaf area distribution in eastern white pine (*Pinus strobus* L.) with a portable light meter,” *Tree Physiology* **7**,125-134

LISA

Tabel 1. Kasutatud satelliidipiltide andmed.

Pildistamise aasta	Päeva nr.	Kuupäev	Fenoloogiline aeg, kraadpäev	Fenoloogiline aeg, keskmine, kraadpäev	Päikese kõrgus, kraadides	Skanner
1988	136	16. mai	108	154	48,3	Landsat 5
1994	129	9. mai	116	112	48,9	SPOT 3
1994	130	10. mai	127	118	45,9	Landsat 5
2000	129	9. mai	176	112	47,4	Landsat 7
1992	147	27. mai	185	226	49,8	Landsat 5
1998	132	12. mai	198	128	47,3	Landsat 5
1996	143	23. mai	200	199	48,2	Landsat 5
2002	152	1. juuni	350	265	51,5	Landsat 7
2000	157	6. juuni	419	314	52,7	Landsat 7
2003	175	24. juuni	473	503	54,8	SPOT 4
2001	176	25. juuni	477	514	54,5	SPOT 2
1986	166	15. juuni	492	410	54,6	SPOT 1
1992	180	29. juuni	546	559	51,2	Landsat 5
2001	185	4. juuli	595	618	53,9	SPOT 4
1999	191	10. juuli	803	695	51,7	Landsat 7
2002	195	14. juuli	863	747	53,0	SPOT 4
1992	206	25. juuli	882	883	51,3	SPOT 1
2002	200	19. juuli	939	807	50,2	Landsat 7
1997	225	13. aug.	1057	1120	46,2	SPOT 1
2000	239	27. aug.	1258	1266	46,2	SPOT 4
1997	241	29. aug.	1276	1286	38,6	Landsat 5
1995	236	24. aug.	1290	1237	38,2	Landsat 5
2002	232	20. aug.	1405	1196	42,3	Landsat 7

Tabel 2. Landsati ja SPOTi skannerite lainepikkuste vahemikud

Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ kanal	Lainepikkuste vahemik, nm	SPOT 1,2,3 kanal	Lainepikkuste vahemik, nm	SPOT 4 kanal	Lainepikkuste vahemik, nm
TM1, sinine	450-520				
TM2, roheline	520-600	XS1, roheline	500-590	XS1, roheline	500-590
TM3, punane	630-690	XS2, punane	610-680	XS2, punane	610-680
TM4, NIR	760-900	XS3, NIR	780-890	XS3, NIR	780-890
TM5, MIR	1550-1750			XS4, MIR	1580-1750
TM7, MIR	2080-2350				

(Landsati ja SPOTi skannerite andmed:

http://www.ga.gov.au/acres/prod_ser/landdata.jsp ja

http://www.spot.com/html/SICORP/_401_444_445_.php)

Tabel 3. Mudelarvutused: Päikese kõrgus

Päeva nr	Kuupäev	Päikese kõrgus (kraadides)	Fenoloogiline aeg (kraadpäevades)
120	30.apr	44,3	98,5
130	9. mai	41,7	178,8
140	19. mai	39,6	255,2
150	29. mai	38,15	303,8
160	8. juuni	37,4	411,3
170	18. juuni	37,25	542,3
180	28. juuni	37,8	624,4
190	8. juuli	39,0	727,2
200	18. juuli	40,7	835,6
210	28. juuli	42,9	956,7
220	7. aug.	45,5	1069,6
230	17. aug.	48,5	1152,1
240	27. aug.	51,8	1239,9
250	6. sept.	55,3	1296,7

Tabel 4. Mudelarvutuste käigus muudetud olulisemad parameetrid

Metsatüüp	Puurinne									Alustaimestik								
	Lehtede mass puu kohta (kg)			Klorofüll (% SLW-st)			Vesi (% SLW-st)			LAI			Klorofüll (% SLW-st)			Vesi (% SLW-st)		
	120. päev	190. päev	250. päev	120. päev	190. päev	250. päev	120. päev	190. päev	250. päev	120. päev	190. päev	250. päev	120. päev	190. päev	250. päev	120. päev	190. päev	250. päev
Hea kk. kaasikud	0,001	1,9	1,6	0,60	0,70	0,50	130	150	140	1,75	5,0	4,0	0,40	0,95	0,60	90	180	200
Kehva kk. kaasikud	0,001	1,6	0,57	0,58	0,58	0,40	130	130	130	0,05	2,5	2,0	0,01	0,50	0,40	200	130	160
Hea kk. männikud	3,4	4,6	4,6	0,65	0,65	0,65	200	200	250	0,30	2,5	1,0	0,30	0,63	0,30	200	136	300
Kehva kk. männikud	1,5	2,0	2,0	0,58	0,58	0,58	160	200	200	1,0	1,6	1,0	0,40	0,40	0,40	200	200	400
Rabamännikud	0,6	0,9	0,9	0,35	0,40	0,37	250	160	160	1,0	2,3	2,2	0,35	0,35	0,32	200	150	150
Kuusikud	7,5	10,0	10	0,65	0,65	0,65	200	200	250	0,30	2,5	1,0	0,30	0,63	0,30	200	136	300

Metsatüüp	Samblarinne								
	LAI			Klorofüll (% SLW-st)			Vesi (% SLW-st)		
	120. päev	190. päev	250. päev	120. päev	190. päev	250. päev	120. päev	190. päev	250. päev
Hea kk. kaasikud	0,60	0,50	0,60	0,40	0,40	0,40	100	160	220
Kehva kk. kaasikud	0,60	0,60	0,60	0,40	0,40	0,40	160	130	160
Hea kk. männikud	1,0	1,6	1,0	0,40	0,40	0,40	400	200	500
Kehva kk. männikud	0,50	1,5	1,0	0,30	0,50	0,30	200	136	200
Rabamännikud	1,0	1,3	1,3	0,20	0,15	0,15	300	200	200
Kuusikud	1,0	1,6	1,0	0,40	0,40	0,40	200	200	500

Tabel 5. Simuleeritud ja satelliidipiltidelt saadud heleduskordajate vahelised ruutkeskmise hälbe (RMSD) väärtused

RMSD – ruutkeskmise hälve

RMSD/keskmTM – ruutkeskmise hälve jagatud sesooni keskmise heleduskordaja väärtusega vastavas kanalis vastava metsatüübi kohta

Metsatüüp	Suurus	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
Rabamännikud	RMSD	0.0069	0.0334	0.0056	0.0313	0.0253	0.0037
	RMSD/keskm TM	0.137	0.473	0.078	0.105	0.129	0.042
Hea kasvukoha kaasikud	RMSD	0.0063	0.0037	0.0046	0.0639	0.0241	0.0123
	RMSD/keskm TM	0.212	0.088	0.165	0.202	0.162	0.242
Hea kasvukoha kaasikud	RMSD	0.0084	0.0138	0.0085	0.0395	0.0307	0.0129
	RMSD/keskm TM	0.221	0.261	0.206	0.143	0.180	0.187
Kuusikud	RMSD	0.0071	0.0033	0.0035	0.0160	0.0065	0.0108
	RMSD/keskm TM	0.260	0.089	0.136	0.067	0.062	0.302
Hea kasvukoha männikud	RMSD	0.0062	0.0077	0.0020	0.0117	0.0111	0.0215
	RMSD/keskm TM	0.214	0.201	0.071	0.051	0.101	0.556
Kehva kasvukoha männikud	RMSD	0.0067	0.0093	0.0044	0.0120	0.0090	0.0148
	RMSD/keskm TM	0.193	0.200	0.120	0.052	0.071	0.288