

TARTU ÜLIKOOL  
FÜÜSIKA-KEEMIA TEADUSKOND  
KESKKONNAFÜÜSIKA INSTITUUT

TARTU OBSERVATOORIUM

SILVER LÄTT

**PÄIKESE ULTRAVIOLETTKIIRGUSE  
SPEKTROMEETRIA**

Magistritöö keskkonnafüüsikast

Juhendaja: Tartu Observatooriumi vanemteadur,  
Ph.D. Uno Veismann

TARTU 2005

# Sisukord

<b>1</b>	<b>SISSEJUHATUS.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>PÄIKESE ULTRAVIOLETTKIIRGUSE SPEKTRAALJAOTUS .....</b>	<b>5</b>
	PÄIKESE ULTRAVIOLETTKIIRGUS .....	5
	OSOON.....	7
	PILVEDE MÕJU ULTRAVIOLETTKIIRGUSELE .....	8
	MUUD KIIRITUSTIHEDUST MÕJUTAVAD TEGURID .....	9
	UV KIIRGUSE TASEMETE REGISTREERIMINE .....	10
	SPEKTRAALSEADMED .....	12
	RAHVUSVAHELISE METEOROLOOGIAORGANISATSIOONI (WMO) NÕUDED PÄIKESE UV- SPEKTROMEETRITELE .....	15
	<i>Nõuete sätestamise põhimõtted.....</i>	<i>15</i>
	<i>Nõuded S-1 tüüpi instrumentidele.....</i>	<i>18</i>
	<i>Nõuded S-2 tüüpi instrumentidele.....</i>	<i>19</i>
	KAASAEGSED MIKROSPEKTROMEETRID.....	20
<b>3</b>	<b>MÕÕTESÜSTEEMI KIRJELDUS.....</b>	<b>21</b>
	MÕÕTEOTSIK JA SISENDOPTIKA .....	22
	SPEKTROMEETER JA TERMOSTAAT .....	24
	MÕÕTESÜSTEEMI ARVUTIJUHTIMINE.....	25
	KALIBREERIMINE .....	29
	REGISTREERITUD SPEKTER .....	30
	EDUCE KVALITEEDINÕUDED.....	30
	<i>Meetodid .....</i>	<i>30</i>
	<i>Simulatsioonimeetod Fastrt .....</i>	<i>31</i>
<b>4</b>	<b>SPEKTRITE USALDATAVUSE ANALÜÜS.....</b>	<b>33</b>
	VÕRDUSED KITSASRIBA-SENSORIGA CUVB1.....	33
	VÕRDLUSED MODELLEERITUD SPEKTRITEGA.....	34
	SUHTESPEKTRITE KASUTAMINE.....	35
	<b>KOKKUVÕTE .....</b>	<b>38</b>
	<b>KASUTATUD KIRJANDUS.....</b>	<b>39</b>

# 1 SISSEJUHATUS

Päikeselt lähtuv ultraviolettkiirgus ja selle mõju inimestele on leidnud viimaste aastakümnete jooksul laia kõlapinda. Teema aktuaalsust näitab fakt, et üks enim uuritud ultraviolettkiirgusega seotud aspekte on olnud erüteemsed efektid ja nende seotus nahavähiga. Ultraviolettkiirguse klimatoloogiline monitooring peab andma selge ettekujutuse kiiritustiheduse fluktuatsioonidest mitmes ajaskaalas ning võimaldama kindlaks määrata kas need muutused on juhuslikud (seotud näiteks pilvise/selge ilma vaheldumisega), tsüklilised (seotud näiteks aastaegade) või jälgivad mingit kindlat trendi. Kõige rohkem pakub huvi muidugi viimati mainitud juht, mille karakterne ajaskaala on võrreldav inimese elueaga. Just see ongi põhjuseks, miks on vaja vaatlusandmeid koguda pidevalt ning võimalikult stabiilsetes tingimustes. Nende tingimuste täitmiseks peab ultraviolettkiirgust registreeriv seade olema polüfunktsionaalne, see tähendab tootma andmeid vastavalt erinevate uurimisrühmade vajadusele, olema ajalise degradeerumise tõttu hõlpsasti rekaliibreeritav. Paljude huvide arvestamiseks peaks seade registreerima kiirguse spektraaljaotust, millest hiljem on vajadusel võimalik arvutada suvalisse lainepikkuste vahemikku langevat summaarset energiat ja võimaldama esitada spektrist muul moel arvutatavaid suurusi nagu näiteks efektiivsed neeldumisdoosid, UV-indeks jne. Registreerimisseadet peaks olema ka perioodiliselt laboris tehtavaks rekaliibratsiooniks piisavalt kerge transportida.

Peale Euroopa Komisjoni poolt toetatud, viienda raamprogrammi käigus toimunud projekti EDUCE-ga (European Database for UV Climatology and Evaluation) liitumist oli Tartu Observatoorium ainus osavõttev asutus, kus puudus aparatuur ultraviolettkiirguse spektraalse iseloomu uurimiseks. Olukorra parandamiseks on astatud mitmeid samme. Käesolev magistriväitekiri on jätkuks bakalaureusetööle “Päikese ultraviolettkiirguse spektromeetria” [Lätt, 2003], mis oli ettevalmistavaks etapiks uue spektromeetri soetamisele. Praeguseks see on hangitud ning töörühma pingutuste tulemusena Tõraveres komplekteeritud mõõtesüsteem, mis alates üheteistkümnendast juulist 2004 salvestab regulaarselt, 15-minutilise intervalliga spektreid ultraviolettpiirkonnas. Sobiva registreerimisreshiimi otsingud ning mõõtesüsteemi testimine toimusid aga juba aprillikuust alates.

Töö esimeses osas antakse ülevaade probleemi aktuaalsusest ning nõuetest mõõtmisteks kasutatavatele seadmetele. Järgnevalt tuuakse mõõtesüsteemi detailne kirjeldus: esitatakse mõõtesüsteemi riistvara ülesehitus ning parameetrid, kirjeldatakse spektrite kuvamiseks ning uurimiseks tarvitavat kasutajaliidest ning tuuakse ära hetkel kasutusel olev kvaliteedikontrolli süsteemi kirjeldus. Viimases peatükis uuritakse salvestatud spektreid võrreldes neid teiste ultraviolettkiirgust registreerivate seadmete ning mudelist arvutatud suurustega.

## 2 PÄIKESE ULTRAVIOLETTKIIRGUSE SPEKTRAALJAOTUS

### ***Päikese ultraviolettkiirgus***

Suurem osa Päikese kiirgusest lähtub fotosfäärist, mille temperatuur on ligikaudu 6000 K. Spektri lühilainelisem osa aga kiirgub teistest Päikese regioonidest: kolmesajast nanomeetrist väiksematel lainepikkustel kromosfäärist, ning kõige lühematel, viiekümnest nanomeetrist väiksematel - kroonist. Sellest lähtuvalt on Maa atmosfääri jõudva kiirguse spektraaljaotus mõningal määral erinev musta keha omast. Maapinnani jõudva kiirguse spektraaljaotuse määravad ära atmosfääri neelamis- ning hajutamismadused. Päikese spektri äärmised osad neelatakse peaaegu täielikult molekulaarse hapniku ja osooni poolt lühematel ning veeauru ja süsinikdioksiidi poolt pikematel lainepikkustel. Tänu Päikese spektri lühilainelise osa neeldumisele termosfääris, mesosfääris ning stratosfääris on maapinnani jõudva kiirguse lühilaineline piir spektri ultraviolettpiirkonnas<sup>1</sup>. Ultraviolettpiirkonnaks nimetatakse elektromagnetkiirguse spektri seda osa, mille lainepikkus jääb saja ja neljasaja nanomeetri vahele ning mis on veel omakorda jaotatud kolmeks alamregiooniks nimetustega UVA, UVB ja UVC. Ultraviolettkiirguse alamregioonide piirid, olles määratud UVB kiirguse definitsiooniga, on kirjanduses toodud mõnevõrra erinevalt varieerudes kahesaja kaheksakümne ja kahesaja üheksakümne nanomeetri vahel lühilainelise piiri korral ja kolmesaja viieteistkümne ning kolmesaja kahekümne nanomeetri vahel pikema lainepikkusega kiirguse jaoks. Vastavalt Rahvusvahelise Valgustuskomisjoni (Commission Internationale de l'Eclairage – C.I.E.) soovitusel on UVB alamjaotus defineeritud kui lainepikkuste vahemik 280 – 315 nanomeetrit, UVA vastavalt 315 – 400 ning UVC 100 – 280 nanomeetrit. Erialase kirjanduse kasutamisel tuleks siiski olla tähelepanelik ning jälgida autori definitsioone.

Olles kõige lühilainelisem kiirgus, mis suudab jõuda läbi atmosfääri maapinnani on ultraviolettkiirgus otsene põhjus mitmetele, algatuseks kõrge energiaga footoneid vajavatele, keemilistele ja bioloogilistele protsessidele. Kuna enamikul nendest

reaktsioonidest võivad olla negatiivsed tagajärjed kas taimedele või loomadele, siis on viimaste aastakümnete jooksul aktuaalseks muutunud kõikide faktorite, mis võivad viia ultraviolettkiirguse taseme pidevale või märgatavale kasvule, uurimine ning analüüs. Inimkonna poolt atmosfääri paisatud kloorfluorsüsinike (CFC) ja sarnaste ühendite poolt põhjustatud stratosfääri-osoonikihi hõrenemine on tunduvalt suurendanud ultraviolettkiirguse jaotuse uuringuid ja monitooringut terves maailmas. Tänu sellele on sõlmitud mitmeid rahvusvahelisi kokkuleppeid ning algatud programme CFC-de ja neile sarnaste ühendite kasutamise piiramise suhtes. Nende kokkulepete ja programmide teostamise eesmärgiks on seatud osoonikihi järkjärguline täielik taastumine. Praeguseks on siiski jõutud tõdemusele, et ultraviolettkiirguse tase maapinnal omab kasvutrendi.

Osoon ei ole kaugeltki ainus maapinnani jõudva summaarse ultraviolettkiirguse määraja. Atmosfääri ülakihtidesse jõudvast Päikese kiirgusest moodustab ultraviolettkomponent ainult 9,3 protsenti. Maapinnani jõudvas kiirguses on see vähenenud seitsme protsendini. Samas neelatakse kiirgust tunduvalt ka teistel lainepikkustel. Kiirguse nõrgenemist põhjustavad atmosfääris toimuvad neeldumised, hajumised ja peegeldumised, millede intensiivsus omakorda on funktsioon lainepikkusest. Osoon neelab suurel määral UVC piirkonnas ning vähem UVB ja UVA piirkonnas. Lühematel lainepikkustel kui 242 nm neelab ultraviolettkiirguse tavaline molekulaarne hapnik. Ultraviolettkiirguse summaarne vähenemine sõltub teepikkusest atmosfääris ja sellele jäävate neelajate, hajutajate ning peegeldajate hulgast. Teepikkuse määrab Päikese nurkkaugus seniidist (Päikese seniitnurk –  $z$ ), mis omakorda sõltub Maa asukohast orbiidil ning laiuskraadist ja ajast. Otsekiire jaoks on kiirguse nõrgenemine võrdeline  $\cos(z)^{-1}$ -ga, seega on Päikese seniidis olles nõrgenemine kõige väiksem, suurim on see aga Päikese tõusu ja loojangu paiku. Sellest järeldub, et suurtel laiuskraadidel on aastaringselt tegemist suhteliselt suurte teepikkustega ning antud laiuskraadi jaoks muutub otsekiire teepikkus tsükliliselt kahes ajaskaalas – päevases ja aastases. Sarnast muutlikkust omab siis ka summaarne ultraviolettkiirgus. Kiirguse nõrgenemine toimib mitmete mehhanismide kaastoimel, millel kõigil on ka oma karakterne muutumise ajaskaala. Üheks alati Päikese kiirgust nõrgendavaks teguriks on Rayleigh hajumine (see on hajumine, mis toimub

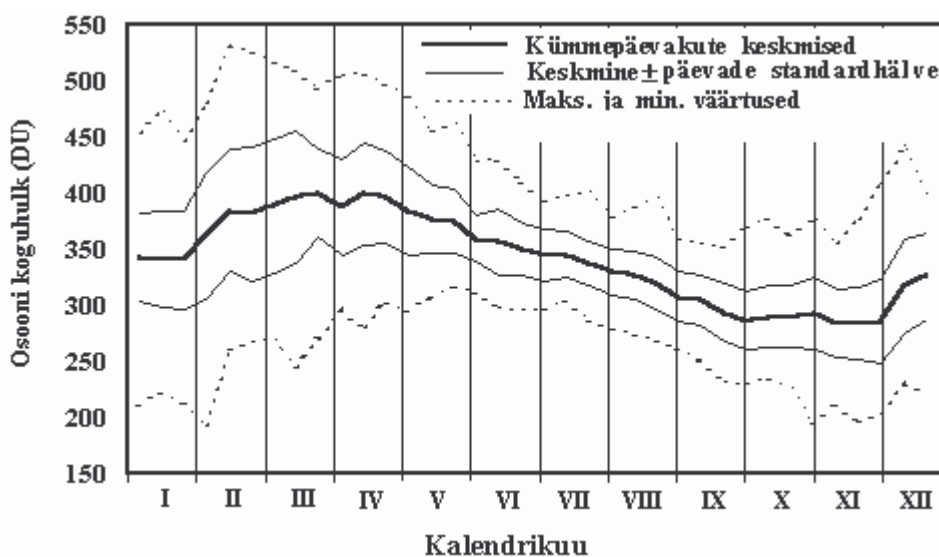
---

<sup>1</sup> Ultra ldn väljaspool, mujal olev

gaasimolekulidel ning mida esineb ka hästi puhtas atmosfääris). See protsess toimub kõikidel lainepikkustel ning on proportsionaalne lainepikkuse neljanda astme pöördväärtusega. See tähendab, et enim hajutatakse ultraviolettkiirgust. Küllalt suur hulk kiirgust hajutatakse, võrreldes algse levimissuunaga, tagasi. See tähendab, et märkimisväärne hulk kiirgust peegeldatakse levimisele vastassuunda või jõuab maapinnani keerulisemat teed pidi hajuskiirgusena. Hoopis keerulisem on arvestada hajumist osakestelt, mille raadius on 0.1 kuni 25 kiirguse lainepikkust. Sellist hajumist nimetatakse Mie hajumiseks ning see on kõige intensiivsem levimissuunas. Samuti kasvab levimissuunas toimuva hajumise osakaal hajutavate osakeste mõõtmete suurenedes. See viib aga näiteks maapinnalt vaadates otsesihil Päikesega asuvate osakeste ja mujal asuvate osakeste erinevale panusele hajutamisel. Mie hajumine on ka põhjuseks sellele, et maapinnalt vaadatuna paistab Päikese ümbrus valgena, mitte sinisena nagu ülejäänud taevas.

## Osoon

Kõige enam neelab ultraviolettkiirgust osoon, millest 90% paikneb stratosfääris. Suur UVC piirkonna neelamine osooni ning molekulaarse hapniku poolt eemaldab spektrist selle enne maapinnani jõudmist üsna täielikult. Lainepikkuse kasvades on osoonil jätkuvalt põhiroll ultraviolettkiirguse neelamisel, kuid see kahaneb kiiresti UVB piirkonnas ning lainepikkusel 320 nanomeetrit on ligikaudu vaid 1% võrreldes



Joonis 1. Osooni koguhulga muutumine Eesti kohal aasta jooksul (1979–2000 andmetest)

neeldumisega lainepikkusel 280 nanomeetrit. Alates 340-st nanomeetrist võib osooni neelamise täielikult kõrvale heita. Nimetatud faktist tuleneb ka spektraalse kiiritustiheduse järsk kasv Päikese spektri UVB piirkonnas. Sellest omakorda on võimalik leida maapinnani jõudvate footonite maksimaalne energia (minimaalne lainepikkus), mis sõltub peamiselt reaalsest teepikkusest aga ka laiuskraadist ja aastaajast. Kaks viimast määravad ära stratosfääriosooni jaotuse ning hulga. Veel neelab ultraviolettkiirgust troposfääris paiknev osoon.

### ***Pilvede mõju ultraviolettkiirgusele***

Kiirguse tagasipeegeldumine toimub pilvedelt või maapinnalt. Pilvede ülemistest kihtidest peegeldunud kiirgus ei jõua suure tõenäosusega kunagi maapinnani. Maapinnalt peegeldunud kiirgus võib aga pöörduda tagasi kosmosesse, peegelduda uuesti pilvede alumistelt pindadelt või hajuda, suurendades seega veelgi maapinnale langeva kiirguse hulka. Ka selle teguri osakaal muutub perioodiliselt ja sõltub geograafilisest asukohast. Mõnede regioonide pinna peegeldumistegur võib aastaegade lõikes olla väga stabiilne, teistes regioonides aga tunduvalt muutuda (näiteks suvel taimedega kaetult on UV piirkonnas peegeldumistegur 0,02 ning talvel lumega 0,6 – 1,0).

Pilvede panus maapinnani jõudvas kiirguses varieerub suuresti nii aja- kui ka ruumiskaalades. Peale langeva kiirguse peegeldamise pilved ka neelavad ja hajutavad läbiminevat kiirgust. Mõju maapinnale langevale ultraviolettkiirgusele sõltub pilve ruumilisest jaotusest ning paksusest ja on võrreldav mõjule nähtavale valgusele. Näiteks peatab paks, peaaegu läbipaistmatu pilvekiht otsekiirguse täielikult ning vähendab sellega tunduvalt kiiritustihedust. Vastupidiselt eelmisele võivad aga taevas hajutatult paiknevad rünkpilved ajutiselt muuta kiiritustihedust (selge taevaga võrreldes) isegi suuremaks. Kiiritustihedust suurendab edasihajumine ning peegeldumine pilve servadelt. See on aga väga lühiajaline nähtus ning mõni aeg hiljem katab pilv suure tõenäosusega Päikese, vähendades seega kiiritustihedust ning jättes summaarse kiirguse taseme hinnanguliselt samaks. Võrreldes osooni muutuste mõjuga spektritele ei oma pilvisuse muutused märgatavat spektraalsõltuvust vaid kahandavad ühtlaselt kogu spektraalset kiiritustihedust [Bais jt., 1993]. Kahjuks ei ole võimalik pilvede kihilisuse ja paksuse kohta teha kindlaid hinnanguid ainult alt poolt

või ülevalt (satelliidid) toimuvate vaatluste tulemusena. Sellist teavet võivad aga anda lennukid, mis oma lennutrajektoori läbimise jooksul edastavad informatsiooni pilvede kohta.

Pilve ehituse ja koostise kindlaks tegemine on veel raskem ülesanne. Tilgakeste suurusjaotuse määramist ei teostata regulaarselt vaid ainult eriprogrammide raames. See teeb pilvede mõju ja koostise muutumise määramise veelgi raskemaks. Olles klimatoloogilistes ajaskaalades (30 või rohkem aastat) keskmistena stabiilsed võivad pilvkatte lühiajalised muutused olla vägagi drastilised. Osooni hävimise keskmise tempo juures on pilvisuse ja seega ka ultraviolettkiirguse ebäühtlase ajalise jaotuse taustal toimuvad trendilaadsed ultraviolettkiirguse muutused detekteeritavad kümne kuni saja aasta andmete analüüsist.

### ***Muud kiiritustihedust mõjutavad tegurid***

Troposfääris neelavad ultraviolettkiirgust ka vääveldioksiid ( $\text{SO}_2$ ) ning vähemal määral lämmastikdioksiid ( $\text{NO}_2$ ). Nende ühendite otsene mõju kiirguse hulgal on tänapäeval väike, kuid neil on ka kaudne mõju õhkkonna keemilise koostise muutumisele. Aerosoolide hulk varieerub vastavalt tööstuse muutustele ning võib kõikuda sõltuvalt töötundidest, nõudlusest kaupadele ning ilmastikutingimustest. On olemas arvamus, et aerosooli hulga muutused võivad olla piisavad varjamaks osoonikihi vähenemistest põhjustatud ultraviolettkiirguse taseme muutumist. Atmosfääri-aerosoolid nõrgendavad otsekiirgust, kuid suurendavad hajusat ning võivad summaarse kiiritustiheduse maapinnal samaks jätta. Näiteks paiskus Pinatubo vulkaanipurske tagajärjel atmosfääri suurel hulgal aerosooli, mis järgnevat kuude vältel hajusid üle maailma. Sel konkreetsel juhul oli aerosoolil kaks erinevat mõju järgnevat aastate ultraviolettkiirguse tasemele. Esmalt aitasid aerosooli osakesed kaasa osooni lagundamisele ning teiseks hajutasid rohkem ultraviolettkiirgust muutes otse ja hajuskiirguse suhet, ning vähemal määral summaarset kiirgushulka. Purskele järgnevatel aastatel toimus aerosooli toimel stratosfääri alumiste kihtide soojenemine ja troposfääri teatav üldine jahenemine. Need nähtused olid suhteliselt lühiajalised, piirdudes umbes kolme aastaga, ning lõppesid, kui Pinatubo aerosool jõudis stratosfäärast välja sadeneda.

Viimasena tuleks arvestada ka atmosfäärini jõudva Päikese kiirguse spektraaljaotuse muutusi, mis omakorda toimuvad karaktersetes ajaskaalades. Näiteks tingib Päikese pöörlemine mõneprotsendilise ultraviolettkiirguse hulga muutumise. Tõsi, muutuse amplituud kahaneb lainepikkuse suurenedes ning jääb 250 nanomeetrist suurematel lainepikkustel väiksemaks kui 1 protsent. Suuremat mõju avaldab Maa tiirlemine mööda elliptilist orbiiti. Maa ja Päikese vahelise kauguse muutused põhjustavad kuni 3,3-protsendilisi erinevusi ultraviolettkiirguse keskmistes vootihedustes juulis ja jaanuaris. Pikemas ajaskaalas mõjutab Päikese spektrit tema aktiivsuse üheteistaastane tsükkel, kuid seda ainult UVC piirkonnas, kus tsükli mõju kiiritustiheduse amplituudile küünib 5 kuni 10 protsendini. UVA ja UVB piirkonnas ei mõjuta see tsükkel kiiritustihedust rohkem kui ühe protsendi ulatuses. UVC diapsoonis mõjutab tsükkel eelkõige tasakaalu stratosfääri-ooni tekkimise/hävimise. Päikese aktiivsuse maksimumi ajal tekib kuni 3 % võrra ohtralt oooni kui miinimumi ajal

Tänapäeval ollakse jõutud arvamusele, et ultraviolettkiirguse hulka maapinnal suurendava olulise tegurina on kahanemistrendi näidanud stratosfääri ooon. Teised tegurid loetakse klimatoloogilises ajaskaalas (kolmkümmend ja rohkem aastat) ligikaudu stabiilseteks, kuid nende muutumise amplituud võib lühemates ajaskaalades olla väga suur. Eesti asub regioonis, mida mõjutab Atlandi ookeanil reguleeritav tsüklonaalne aktiivsus ja siin esineb oluline pilviste-vihmade ning päikeseliste suvede vaheldumine. Teatud vahemikes esineb pilviseid suvesid sagedamini ja teistes harvemini.

### ***UV kiirguse tasemete registreerimine***

Maapinnani jõudva ultraviolettkiirguse hulka on võimalik hinnata kahte moodi: otseselt mõõtes või arvutuslikul teel, kasutades kiirguslevi mudelarvutusi ja teadmisi atmosfääri oleku kohta (näiteks osoonikihi paksus). Mõlemal meetodil on omad puudused ja head küljed. Mudelite eeliseks on võimalus esitada ultraviolettkiirgustiheduse globaalne jaotus ning seda ka tuleviku ja mineviku jaoks arvutada. Kahjuks on mudeli sobivus määratud koostamise ajal kasutatud katseandmete täpsusega. Ultraviolettpiirkonnas kiirgustiheduse modelleerimiseks kindla aja ja koha jaoks ning vaatlusandmetega võrdlemiseks peab täpselt teadma oooni koguhulka ja vertikaalset jaotust atmosfääris, temperatuuri vertikaalset käiku, aerosoolide hulka ja

jaotust suuruse järgi ning teiste ultraviolettkiirgust neelavate ühendite hulka (näiteks  $\text{SO}_2$ ), aluspinna albeedot ning pilvede hulka, tüüpe ja jaotust. Osoonikihi paksuse teadmine on vajalik UVB kiiritustiheduse arvutamiseks, kuid see on kasutu UVA kiiritustiheduse arvutuse juures suurematel lainepikkustel. Osoonikihi paksus saadakse tavaliselt maapealsete vaatlusjaamade ning satelliitide andmeid kombineerides, aga osooni jaotus võetakse sageli idealiseeritud sesoonse klimatoloogilise keskmisena kas otsese vaatlusandmete puudumise või nende ebatäpsuse tõttu. Aerosooli hulk ning albeedo määratakse enamasti hinnanguliselt. Nagu ennegi tõdetud on kõige raskem modelleerida pilvi. Hinnangu saab formuleerida meteoroloogiliste andmete põhjal. Pilvede kiirgust nõrgendavat mõju iseloomustab küllalt hästi aktinomeetriaamades registreeritav integraalne summaarne kiirgus. Samamoodi saab hinnata ka aerosooli optilisi omadusi. Reaalsuses annavad mudelid selge ilmaga suhteliselt hea kooskõla mõõtmistega aga raskused pilvede mõju defineerimisel muudavad pilves ilma korral mudelid ebatäpseks võrreldes sooritatud mõõtmistega. Kehtivate mudelite suureks plussiks võib lugeda fakti, et teades osoonikihi paksust on nende abil võimalik arvutada ultraviolettkiirguse tasemeid selge taeva jaoks kohtades, kus ei ole veel alustatud regulaarset ultraviolettkiirguse monitooringut. Samuti on mudelarvutuste abil, teades UV kiiritustihedust, võimalik arvutada osooni koguhulka atmosfääri vertikaalses sambas [Bernhard jt., 2003].

Otsekiirguse hulga arvutamine on küllaltki lihtne, kui on teada atmosfääri komponentide neeldumistegurid. Hajuskiirguse mudelid on tunduvalt keerulisemad, paindlikumad ning avatumad erinevatele lähenemistele. Tänapäevaks on suurt kasu viimati mainitud mudelite uurimisele toonud ka pidev arvutusjõudluse kasv. Otsene kasu mudelistest on näiteks UV indeksi ennustamine. Vastavalt Ülemaailmse Meteoroloogiaorganisatsiooni (WMO) ja Ülemaailmse Terviseorganisatsiooni (WHO) soovitustele esitataksegi tänapäeval üldsusele erüteem-kiiritustihedust UV-indeksina (UVI) [WHO jt., 2002]. Seejuures UV-indeksile 1 vastab 0.025 erüteemselt efektiivset  $\text{W/m}^2$ . Erüteemselt efektiivne kiiritustihedus saadakse spektraalkiiritustiheduse läbikorrutamisel CIE standardi 1987 (DIN5050) järgi määratud erüteem-mõjususe tunnuskõveraga. Sellisel meetodil saadud kaalutud kiirgusvoo mõõtühikuteks on  $W_{ef}/m^2$  ja  $J_{ef}/m^2$ . UV indeks on ühikuta suurus, mis on defineeritud järgneva valemi poolt.

$$I_{UV} = k_{er} \cdot \int_{250nm}^{400nm} E_{\lambda} \cdot s_{er}(\lambda) d\lambda$$

Kus  $E_{\lambda}$  tähistab spektraalset kiiritustihedust (ühikutes  $W/(m^2 \cdot nm)$ ) lainepikkusel  $\lambda$ ,  $s_{er}(\lambda)$  on eelpoolmainitud erütemne mõjuspekter ning  $k_{er}$  konstant, mis on võrdne  $40 m^2/W$ -ga. Suurimad puudujäägid mudelitest UV-indeksi arvutamisel on tingitud puudulikust informatsioonist pilvede ja aerosooli hulga kohta. Samas on UV-indeksi kastamise eesmärgiks anda avalikkusele infot maksimaalselt saadava doosi kohta järgnevatel päevadel. Seega ei kahanda mudeli puudujäägid saadud tulemuste aktuaalsust. Niisuguste mudelite abil on võimalik ennustada ka pikaajalist osoonikihi paksuse ning sellega kaasnevat ultraviolettkiirguse taseme muutust võttes arvesse asjaolu, et keskmine pilvisus ei muutu.

Päikese ultraviolettkiirguse mõõtmist alustati Eestis 1. jaan. 1998 erütemse efektiivsuse kalibreeringut omava sensoriga UV-SET firmalt Scintec. Praegu on EMHI Tartu/Tõravere meteoroloogiajaamas üles seatud UV-A, UV-B, erütemse UV ja 306 nm kitsasriba sensorid.

### **Spektraalseadmed**

Uuritava allika spektraalse kiirgusjaotuse täpne registreerimine võib meile anda mitmekülgset informatsiooni. Kiirgavat ainet ennast võib kindlaks teha keemilistele elementidele omaste kiirgusjoonte registreerimisega. Analoogselt on võimalik määrata allika ja detektori vahel oleva keskkonna keemilist koostist, kui jälgida neeldumisjoonte tekkimist spektris. Seda meetodit kasutatakse osoonikihi paksuse arvutamiseks, mõõtes ultraviolettkiirguse suhtelist intensiivsust lainepikkustel, kus toimub vastavalt tugev ja nõrk neeldumine. Samuti sõltub kiirguse mõju langemispinnale/objektile tema spektraalsetest omadustest. Teades nn mõjuspektrit (näiteks naha erütem-efektiivse tundlikkuse sõltuvust lainepikkusest) ja pinnale langenud kiiritustiheduse spektraaljaotust on võimalik arvutada kiirguse efektiivset mõju pinna materjalile. Näideteks sellistest meetoditest võiksid olla Päikese kiirguse mõjud inimese silmadele ja fotosünteesile nähtavas valguses ning erütemile ja DNA kahjustustele ultraviolettpiirkonnas. Vajalik spektraalne lahutusvõime ja lainepikkuste vahemik, milles mõõtmisi teostatakse, määravad nõutavad spektromeetri parameetrid.

Spektraalmõõtmisteks kasutatavat aparatuuri saab skemaatiliselt lahti seletada järgmiselt. Seade kogub kiirgust etteantud vaateväljast (sisendoptika), jaotab kiirguse sõltuvalt lainepikkusest ruumiliselt laiali (monokromaator), mõõdab kiiritustihedust igal lainepikkusel saades tulemuseks elektrilise signaali (tajur) ning salvestab kogutud andmed. Andmehõivet ja spektromeetrit kontrollib kaasajal arvuti. Päikeselt lähtuva ultraviolettkiirguse registreerimiseks peaks sisendoptika vaateväli olema koosiinuskorregeeritud ning ulatuma ruuminurgani  $2\pi$ . Seda saavutatakse teflonist või kvartsist valmistatud hajutiga. Nurksõltuvus peaks olema ühesugune kõikides hajuti keskpunkti läbivates tasandites, et elimineerida hajuti asimutaaltundlikkuse varieerumisest tulenev süstemaatiline viga (vea sõltuvus päikese kõrgusest). Samuti on nurksõltuvust mitte teades võimatu võrrelda erinevate nurktundlikkustega seadmete andmeid. Seega on registreeritavaks füüsikaliseks suuruseks spektraalne kogukiiritustihedus horisontaalsel pinnal ehk siis poolsfäärist horisontaalsel pinnal kujuneb spektraalne kiiritustihedus. Varjates Päikese ning mõõtes spektri on lisaks võimalik arvutada ka spektraalne otsekiiritustihedus. Viimast kasutatakse näiteks osoonikihi paksuse arutamiseks. Võib kasutada ka kardinaalselt erineva vaateväljaga sisendoptikat. Näiteks saab kitsa vaateväljaga seadet ( $\sim 1$  kraad) kasutada Päikese otsekiirguse mõõtmisteks.

Sisendoptikast kulgeb kiirgus otse või mööda valgusjuhti, milleks võib olla nii vedelik kui optiline kiud, edasi sisendpilu ja kollimaatori kaudu disperseerivale elemendile. Tänapäeval kasutatakse spektromeetrites enamasti difraktsioonvõresid nende vähesel neelavusel pärast. Samuti võib neid optimeerida töötamiseks kindlatel spektraalvahemikel (ingl. *blazing*). Nõrgus võre tekitab küll tasase lainepinna, kuid samas ka aberratsioone, mida on võimalik korrigeerida ainult kitsas lainepikkuste vahemikus.

Ka kiirgustajurile esitatavad nõuded on ranged. Tajur peab olema tundlik, et registreerida ultraviolettspektri kõige lühilainelisemat osa, mille intensiivsus on osoonis neeldumise tõttu väike, kuid mis omab kõige suuremat mõju nahale. Samas on vajalik suur dünaamiline diapasoone ülejäänud ultraviolettspektri mõõtmiseks. Spektromeetrites kasutatakse tajuritena fotokordisteid, CMOS- ja CCD detektoreid ning fotodioode. CMOS ja CCD detektorites lõksustatakse väljalöödud elektronid

mittejuhtivasse piirkonda ning mõõdetakse hiljem. Samuti on võimalik tajurina kasutada fotodiodide jada, kus fotodiod on ühendatud kondensaatoriga ning signaal saadakse, kui samaaegselt mõõdetakse kõigi laengut.

Spektromeeter peab olema võimeline töötama igasugustes ilmastikutingimustes. Näiteks peab seade taluma temperatuuri ja niiskuse kõikumisi. Sellepärast paigutatakse nii monokromaator kui ka tajur vee- ja niiskuskindlasse termostateeritud korpusesse. Alternatiivselt tuuakse kiirgus valgusjuhtme abil vaatlusjaamas olevatesse ruumidesse, kus spektromeetril ei tule taluda nii suuri temperatuurimuutusi ega olla kaitstud erinevate ilmastikumõjude vastu.

Suur osa kasutuses olevaid spektromeetrid on kohandatud tööks antud kindlas vaatlusjaamas. Erandiks on Breweri spektrofotomeetrid, mida toodetakse kommertslikult ning kasutatakse põhiliselt osoonikihi paksuse mõõtmiseks, kuid neid on võimalik rakendada ka ultraviolettspektrite salvestamiseks lainepikkustel kuni 325 nanomeetrit (ühekordse monokromaatoriga) ning kuni 365 nanomeetrit (topeltmonokromaatoriga). Tegemist on Dobsoni-tüüpi spektrofotomeetrite asendamiseks loodud seadmega, mis on kohandatud välitingimustele ning suhteliselt autonoomne. Kõige suuremat hooldamist nõuab kvartsist sisendaken. Spektromeetrisse on juba paigaldatud kaks spektraallampi, millede abil toimub automaatne lainepikkuste ja spektromeetri tundlikkuse kalibratsioon (viiel lainepikkusel). See omadus võimaldab spektromeetrit transportida ilma vahepealse kalibreerimiseta. Seade on täielikult programmeeritav tegema tavavaatlusi suvalise ajaintervalli tagant või salvestama kindlaid spektraalvahemikke ettemääratud ajal. Seadme arvutijuhtimine toimub RS232C jadavärati kaudu. Esimesed eksemplarid Breweri spektromeetrist rakendati tööle 1982. aastal. Samuti kasutatakse seda tüüpi spektromeetreid stratosfäärilise ja troposfäärilise lämmastikdioksiidi koguse hindamiseks ja kloordioskiidi hulga mõõtmiseks. Breweri kasutuselevõttu Eestis takistab seadme kuuluvus kõrgemasse hinnaklassi (~100000 USD).

## ***Rahvusvahelise Meteoroloogiaorganisatsiooni (WMO) nõuded Päikese UV-spektromeetritele***

### **Nõuete sätestamise põhimõtted**

Ultraviolettkiirguse uurimise eesmärgid määravad otseselt nõuded kiirguse registreerimiseks kasutatavatele seadmetele. Järgnevalt on toodud mõningad näited ultraviolettkiirguse uurimise suundadest:

1. leida ja uurida ultraviolettkiirguse trende pikaajalist monitooringut kasutades,
2. toota andmemassiive kiirguslevi mudelite ja satelliitide andmetest arvutatud maapealsete kiiritustiheduste kontrolliks,
3. uurida kiirguse spektraaltiheduse sõltuvust geograafilisest asukohast,
4. saada teadmisi tegelike ultraviolettkiirguse tasemete kohta,
5. aidata kaasa UV-indeksi arvutamisele.

Mõned nendest ettevõtmistest (näiteks trendide leidmine) vajavad väga täpseid ja äärmiselt stabiilseid registreerimisseadmeid, sest olemasolevad trendid on väikesed. Vastupidiselt piisab mõnede ülesannete täitmiseks vähematest nõudmistest aparatuurile. Näiteks erüteemselte efektiivse doosi ja seega UV-indeksi arvutamine. Sellest lähtuvalt ongi WMO soovitus järgi defineeritud kahte tüüpi spektraalseadmeid vaatlusteks ultraviolettpiirkonnas – S-1 ja S-2 [WMO, 1997 b]. S-2 tüüpi seadmetelt nõutakse suurimat täpsust ning stabiilsust. Esitades nõudeid S-1 tüüpi seadmete täpsusele on leitud kompromiss rahaliste vahendite olemasolu ja teaduslike eesmärkide vahel. See loomulikult ei tähenda veel S-1 tüüpi seadmete mittekõlblikkust ultraviolettkiirguse monitooringuks ning trendide uurimiseks (eeldusel et trendid on suured). Samuti soovitatakse, et igal instrumendil oleks vähemalt üks täiskohaga teadlasest või insenerist operaator. Teaduse ja tehnoloogia arengu käigus võidakse seadmetüüpe ka juurde defineerida. Samas jäetakse operaatori vabaks valikuks järgmised parameetrid:

1. sisendoptika lahendus,
2. monokromaatori skeem,
3. tajur (fotokordisti või diodmaatriks),
4. võimendi ehitus.

Suurelt jaolt on nõuded esitatud seadme täpsusele, mitte konstruktsioonile. Mõnede nõuete all, nagu lainepikkuse täpsus, peetakse silmas ettekirjutusi toorandmete

töötlustest saadavatele tulemustele. Kuigi mõned nõuded on vajalikud ainult UVB piirkonnas, ei ole välja antud eraldi eeskirju UVA ja UVB piirkonna jaoks, sest vastavuse saavutamine enamikele UVB piirkonna nõuetele on UVA piirkonnas on lihtne.

Kasulik, kuid ambitsioonikas püüe on sellistele nõuetele vastavate spektraalseadmetega määratleda ühe protsendine keskmine osoonikihi paksuse muutus (klimatoloogilises ajaskaalas). Eelnevatest kogemustest on teada, et minimaalne kalibratsioonist tingitud määramatus, mida suudetakse hoida on 5%. Soovitud eesmärgi saavutamiseks peaksid mõõtmised toimuma ultraviolettspektri lühilainelisemas osas, kus vähene osoonist tingitud muutused on kergemini detekteeritavad.

Sisendoptika tundlikkuse nurksõltuvuse erinevused ideaalsest on kaasaegsetes seadmetes 60-kraadise langemisnurga juures kuni 10% ning 70° juures ligikaudu 17%. 350-nanomeetrise lainepikkuse juures alahindavad sellised spektromeetrid kogu kiiritustihedust sõltuvalt Päikese kõrgusest 7 kuni 13 protsenti. Kuigi kasutatakse mitmeid korrektsioonimeetodeid, on nurksõltuvuse määramatused võrreldavad lainepikkuse skaala või tajuri tundlikkuse määramatustega. Ka ei anna need meetodid soovitud tulemust taeva pilvisuse suurenemisel.

Osooni poolt põhjustatud ultraviolettkiirguse tasemete muutused on esmatähtsad UVB piirkonnas ning pole jälgitavad 340-st nanomeetrist suurematel lainepikkustel. Minimaalse spektraalse ulatuse nõude sätestamisel on arvesse võetud fakti, et kui osooni poolt tingitud UV kiirguse muutusi tahetakse jälgida teiste tegurite poolt tekitatud fluktuatsioonide taustal, peab kindlasti monitooringut teostama ka lainepikkuste vahemikus, kus ei ole tunda osooni neelavat mõju. Samas peab arvestama ka näiteks erüteem-efektiivse mõjususe tunnuskõvera ulatuvust kuni 400 nanomeetrini. See võimaldab korrektselt arvutada bioloogiliselt efektiivset kiiritustihedust. Lai spektraalriba võimaldab süvendatult uurida ka atmosfääri kiirguslevi mudeleid, eraldades selgemalt osooni, aerosoolide, pilvede ja Rayleigh hajumise mõju ultraviolettkiirgusele.

Üldiselt lubab väiksem ribalaius paremini määrata lainepikkuste skaalat ning vähendada süstemaatilisi vigu kiirguse mõõtmisel, mis võivad olla tingitud energiatiheduse järsust spektraalsest kasvust UVB piirkonnas. Kui ribalaiuse mõjusid ei korrigeerita, avaldub viimati mainitud tegur kiiritustiheduse ülehindamise näol. Näiteks kolmnurga-kujulise aparaatfunktsiooniga (poollaius 1 nanomeeter) seadme korral on pikemate lainepikkuste „tiiva“ panus kiiritustiheduse kasvus lainepikkusel 295 nanomeetrit (eeldades Päikese kõrguse horisondist 60 kraadi) ligikaudu 6,4 protsenti. Sama tegur annab 300 nanomeetri juures kasvu 1,8 protsenti. Teisalt vähendab kitsam ribalaius ka kasulikku signaali. Sellest lähtuvalt on spektraalseadme ribalaius kompromiss lainepikkuste skaala täpsuse, spektri muutumise ulatusest tingitud süstemaatiliste vigade ning signaal-müra suhte vahel.

Tänu ultraviolettkiirguse spektraaltiheduse järsule kasvule UVB piirkonnas kandub lainepikkuste skaala määramatus võimendatult üle kiiritustiheduse määramatuseks. Näiteks põhjustab lainepikkuste skaala määramatus 0,1 nanomeetrit ebatäpsusi kiiritustiheduses kuni 9 ja 5 protsenti vastavalt lainepikkustel 295 ja 300 nanomeetrit. Erüteemselt kaalutud kiiritustiheduses on sama lainepikkuste määramatuse puhul viga aga ainult 2%. Sellest tulenevad ka erinevad nõuded eri tüüpi seadmetele.

Spektraalset kiiritustihedust peaks mõõtma diskreetsetel lainepikkustel ning kahe punkti kaugus lainepikkuste skaalal peaks olema tunduvalt väiksem, kui aparaatfunktsiooni poolt defineeritud ribalaius. Põhjuseid selleks on mitu:

1. väiksem interpoleerimisest tingitud müra,
2. spektrist on võimalik välja eraldada tundmatud emissioonijooned,
3. on võimalik paremini fikseerida lainepikkuste skaalat.

Paljud spektromeetri parameetrid on temperatuuri funktsioonid. Sellest lähtuvalt peaks temperatuur olema piisavalt stabiilne, et teised spektromeetri parameetrid muutuksid talutavuse piirides.

Võimaluse korral tuleks kõikidel lainepikkustel mõõta kiiritustihedust paralleelselt. Seda on võimalik teha ainult jadadetektorit (diodmaatriksit) kasutades. Muutuvate spektrite salvestamine tõstab hilisema töötluse keerukuse astet.

Integreerimisaja suhtes ettekirjutusi tehtud ei ole. Kuid kui kogu spektrit ei salvestata korraga, tuleb leida kompromiss integreerimisaja (signaal/müra suhte) ja kogu spektri salvestamise aja vahel.

Ideaalsel juhul tuleks salvestada spektreid nii tihedasti kui võimalik. On leitud, et salvestusperiood kaks spektrit tunnis võib pilvistel päevadel summaartulemustes kajastuda veana kuni 10%. Sellest lähtuvalt on näiteks pilvede mõju uurimisel soovituslik salvestada spektreid nii tihti kui võimalik.

### Nõuded S-1 tüüpi instrumentidele

S-1 tüüpi spektraalseadmed on mõeldud ultraviolettkiirguse monitooringuks ning on kommertslikult toodetavad. Seda tüüpi seadmete konkreetset ülesanded oleksid:

1. lähtudes seadmete hinnast saada teatud tervikpilt ultraviolettklimatoloogiast tänu seadmete laiale kasutusele,
2. hinnata ultraviolettkiirguse sõltuvust geograafilisest asukohast,
3. võimaldada arvutada UV-indeksit ja muid efektiivväärtusi.

Nagu eelpool mainitud on nõuetes tehtud kompromiss seadme hinna ning teaduslike eesmärkide vahel. Sellest lähtuvalt on nõuded esitatud järgnevalt.

Parameeter	Väärtus
Nurktundlikkuse erinevus ideaalsest	$< \pm 10\%$ $< 60^\circ$ langemisnurkade jaoks
Minimaalne spektraalne ulatus	290 – 325 nm
Ribalaius (FWHM)	$< 1$ nm
Lainepikkuste skaala täpsus	$< \pm 0.1$ nm
Aparaatfunktsioon	$< 10^{-3}$ maksimaalsest $2,5 \times \text{FWHM}$ kaugusel keskmest
Diskreetimisintervall (lainepikkuste jaoks)	$< \text{FWHM}$
Maksimaalne kiiritustihedus	$> 1 \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$ lainepikkusel 325 nm ja kui võimalik siis $2 \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$ lainepikkusel 400 nm
Tundlikkuse lävi	$< 5 \times 10^{-5} \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$
Parasiitvalgus	$< 5 \times 10^{-4} \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$ kui Päike asub minimaalse seniitnurga all
Aparaadi temperatuur	Jälgitav ning piisavalt stabiilne muutmaks teisi parameetreid ainult lubatud piirides

Spektri salvestamise kiirus	< 10 min spektri kohta
Üldine kalibratsioonist tingitud määramatus	< ± 10%
Spektri salvestamise kuupäev ja kellaaeg	Salvestatakse paralleelselt iga lainepikkusega ning täpsusega 10 sekundit

**Tabel 1. Nõuded S-1 tüüpi seadmetele**

FWHM = Full Width Half Maximum, ribalaius poole maksimumi tasemel

## Nõuded S-2 tüüpi instrumentidele

S-2 tüüpi seadmete põhilised kasutusvaldkonnad oleksid [WMO, 1997 b]:

1. spektraalselt lahutuvate trendide uurimine,
2. kiirguslevi mudelite kontroll,
3. atmosfääri koostise muutumise mõjud ultraviolettkiirguse osas,
4. ultraviolettkiirguse pikaajaliste muutuste registreerimine,
5. täpsete UV andmete kättesaadavaks tegemine avalikkusele.

Lähtuvalt nendest eesmärkidest on nõuded S-2 tüüpi seadmetele järgmised.

Parameeter	Väärtus
Nurktundlikkuse erinevus ideaalsest	< ± 5% < 60° langemisnurkade jaoks
Minimaalne spektraalne ulatus	290 – 400 nm
Ribalaius (FWHM)	< 1 nm
Lainepikkuste skaala täpsus	< ± 0,05 nm
Aparaatfunktsioon	< 10 <sup>-3</sup> maksimaalsest 2,5×FWHM kaugusel keskmest < 10 <sup>-5</sup> maksimaalsest 6,0×FWHM kaugusel keskmest
Diskreetimisintervall (lainepikkuste jaoks)	< 0,5×FWHM
Maksimaalne kiiritustihedus	2 W m <sup>-2</sup> nm <sup>-1</sup> lainepikkusel 400 nm
Tundlikkuse lävi	< 10 <sup>-6</sup> W m <sup>-2</sup> nm <sup>-1</sup>
Parasiitvalgus	< 10 <sup>-6</sup> W m <sup>-2</sup> nm <sup>-1</sup> kui Päike asub minimaalse seniitnurga all
Aparaadi temperatuur	Jälgitav, tavaliselt < ±2°C saavutamaks instrumendi stabiilsust
Spektri salvestamise kiirus	< 10 min spektri kohta
Üldine kalibratsioonist tingitud määramatus	< ± 5%

Spektri salvestamise kuupäev ja kellaaeg	Salvestatakse paralleelselt iga lainepikkusega ning täpsusega 10 sekundit
--	---

**Tabel 2. Nõuded S-2 tüüpi seadmetele**

### ***Kaasaegsed mikrospektromeetrid***

Tänapäeval on aina rohkem hakanud populaarust võitma väikeste gabariitide ja suhteliselt heade omaduste ning mõistliku hinnaga spektromeetrid, kus kasutatakse tavaliselt Czerny-Turneri tüüpi monokromaatori skeeme. Nende seadmete suureks eeliseks on liikuvate komponentide puudumine, mis tagab suure vastupidavuse. Seadmega samas korpuses on tavaliselt analoog-digitaalmuundur. Tajuriks on neil tavaliselt CCD, CMOS elementide või fotodiodide maatriks, mis üldiselt on ühemõõtmeline ning valikuliselt varustatud filtrite ning võimaluse korral ka koondava silinderläätsuga. Nagu eelpool mainitud on kaks nõguspeeglit ja difraktsioonvõre kinnitatud järgalt spektromeetri külge. Samuti ei ole üldjuhul võimalik tootjapoolse sekkumiseta modifitseerida spektromeetri sisendpilu. Kiirgust suunatakse spektromeetrisse valgusjuhtme kaudu, mis tänu vähesele neeldumisele võib olla mitmeid meetrid pikk. Valgusjuhe kinnitatakse spektromeetri külge standardpistikutega. Kiirguse kogumiseks on valgusjuhtme teise otsa võimalik ühendada koosinuskorrektsiooni teostav hajuti. Suurem osa spektromeetreid ühendatakse personaalarvutiga RS-232 või USB värati kaudu. Erandina on võimalik osta ka arvuti lisakaardina kasutatavaid mudeleid (ISA ja PCI siin).

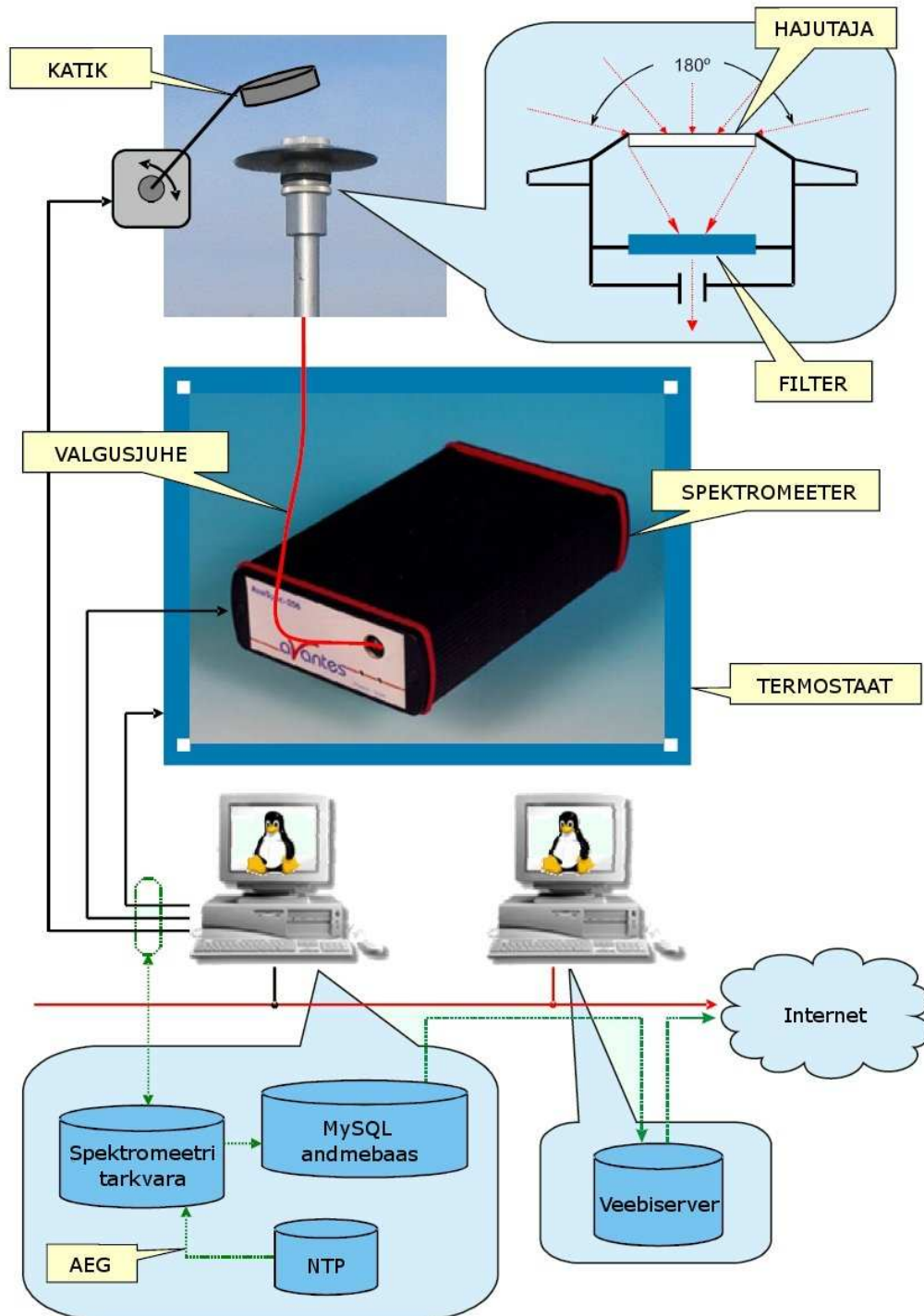
Spektromeetrite tootjatest võiks märkida firmat Ocean Optics<sup>2</sup>. Ocean Optics on Ameerika Ühendriikides 1989 aastal loodud firma, millel on harukontorid ka Euroopas. Firma on välja arendanud ja tootmisesse lasknud ühe esimestest mikrospektromeetritest (S1000). Ocean Opticsi tootekataloog hõlmab spektromeetreid ning kiudoptikat kasutatavaid pH ning hapnikusensoreid. Samuti toodab Ocean Optics optilisi detaile filtritest optilise kiuni.

---

<sup>2</sup> <http://www.oceanoptics.com>

### 3 Mõõtesüsteemi kirjeldus

Joonisel 2 on toodud mõõtesüsteemi skeem, mis annab ülevaate selle ülesehitusest. Käesolev peatüki raames antakse mõõtesüsteemi osade detailne kirjeldus koos komponentide parameetritega.

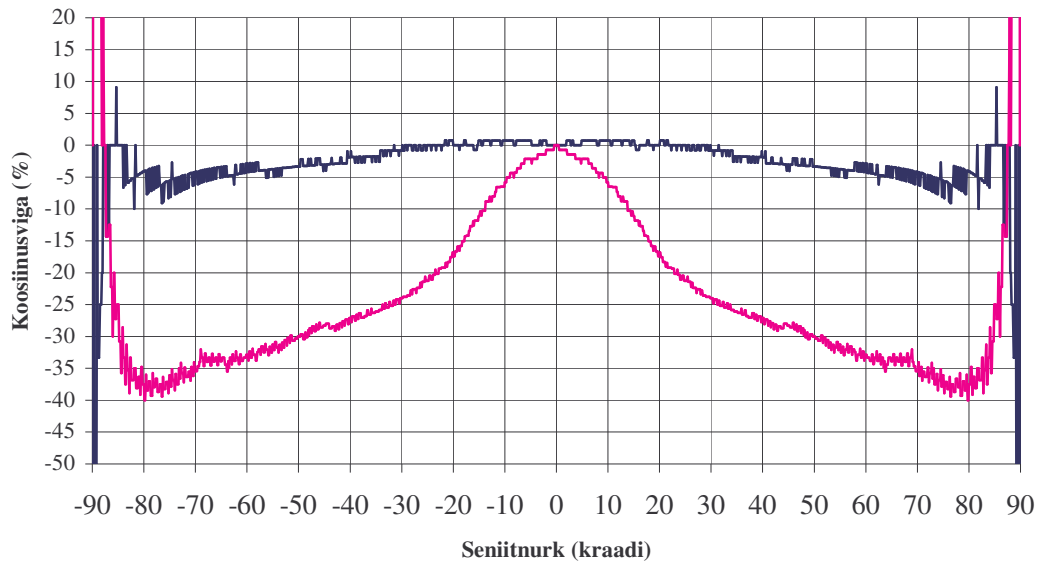


Joonis 2. Mõõtesüsteemi skeem

## ***Mõõteotsik ja sisendoptika***

Mõõtetrakt algab mõõteotsikuga, mis koosneb hajutist, optilisest filtrist, optilise kiu kinnitusest ning mehaanilisest katikust. Mõõteotsiku korpus koosneb objektiivi vaherõngastest ning eritellimusel toodetud hajuti ning optilise kiu kinnitustest. Antud mõõtepea eksemplari konstrueerimisel ei ole lähtutud laiemas kasutuses olevast hermeetilisest ülesehitusest vaid mõõtepea ümber on kavandatud rõngas, milles olevatest aukudest on välisõhul võimalik pääseda korpusesse ja korpuses oleval õhul sealt välja. Kogemused näitavad, et hermeetiliselt suletud ning konstantsel temperatuuril hoitavates mõõtepeades tekib aja jooksul siiski kondensatsioon isegi vaatamata silikageeli kasutamisele. Sellest aspektist lähtudes sai antud mõõtepea konstrueeritud nii, et tänu eelpoolmainitud aukudele oleks võimalik vähendada kondensatsiooni teket korpuses. Kindlasti on sellisel konstruktsioonil ka omad halvad küljed nagu näiteks õhus hõljuva tolmu sattumine optilise kiu otsale jms.

Hajuti on valmistatud tefloni NSVL analoogist – fluoroplast-4-st ning selle kuju ja materjal üldjoontes ei erine lairiba-sensorites kasutatavast. Tüvikoonuslik väliskuju on tingitud vajadusest võimendada suuremate seniitnurkade all langevat kiiritustihedust, kuna horisontaalselt asetseva fluoroplasti plaati läbiv kiiritustihedus ei ole täpselt koosiinussõltuvuses kiirguse langemisnurgast [Bernhard ja Seckmeyer, 1997]. Mõõtmisperioodi vältel on kasutuses kaks erinevat hajutit. Talviseks perioodiks õhem (0,7 mm) ning vastavalt suurema koosiinuseveaga aga samas suuremat signaali andev ning suvel paksem (1,0 mm) variringiga ning väiksema koosiinuseveaga eksemplar. (koosiinusvead joonisel)



**Joonis 3. Hajutaja koosiinusvea nurksõltuvus**

Variring omakorda korrigeerib 80-st kraadist suuremate seniitnurkade korral tekkiva liigse võimenduse. Spektreid, mis on registreeritud kasutades suurema koosiinusveaga hajutit on võimalik arvutuslikult korrigeerida [Feister jt., 1997]. Korrektsiooni teostamine on lihtne lauspilves või täiesti selge taeva korral (isotroopne kiiritustiheduse jaotus või otsekiirus), raskem osalise pilvisuse puhul.

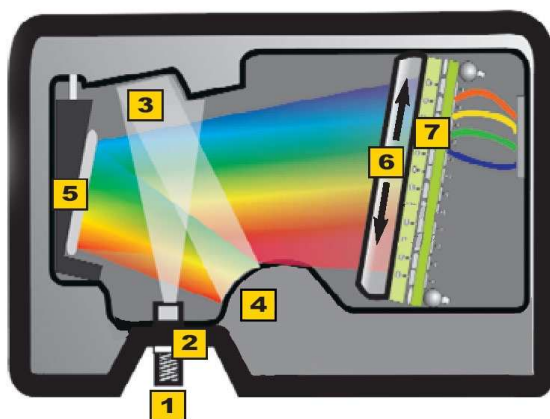
Kuna spektraalne kiiritustihedus muutub ultraviolettpiirkonnas mitme suurusjärgu ulatuses on signaali tarvilik maha suruda suuremate lainepikkuste pool. Selleks sai hajuti taha paigaldatud optiline filter YΦC-5, mille läbilaskvuse maksimum asub 330 nm juures ning, mis neelab praktiliselt kogu kiirguse alates 410 nm-st. Filtri otstarve on nõrgendada mõõtmispiirkonda jäävat pikemalalinelist kiirgust ning pärssida mõõtmispiirkonnast välja jääva kiirguse sisenemist spektromeetrisse, kus viimane võib spektris kajastuda parasiitvalguse ühe komponendina. Sellest tulenevalt nihkub toorspektri maksimum ~340 nanomeetriteni ning võimaldab suurema signaali saamist säriaegade pikendamise abil väiksema loodusliku kiiritustihedusega spektri osas. Siiski on filtril veel kaks läbilaskeriba ~700 ja ~1200 nm juures. Viimaste tõttu spektromeetrisse saavuv kiirgus võib spektris samuti ilmnedada parasiitvalguse ühe komponendina.

Mõõteotsiku konstruktsiooni lõpliku väljakujunemiseni on kasutusel elektromehaaniline katik, mis ei asu mõõtepea sees ning kujutab endast arvutijuhitava elektriajami külge monteeritud, hajutit eest katvat topsi. Hetkel registreeritakse iga mõõdetud spektri juurde ka võrdse säriajaga pimespekter. Kuna mõõtepea on ahvatlev maandumispaik lindudele, tuli möödunud suvel viimaste peletamiseks kasutusele võtta erimeetmeid.

Praeguse mõõteskeemi kohaselt asub mõõtepea vaatlusplatvormil ning sealt suunatakse valgus mööda optilist kiudu laboratooriumis paiknevasse spektromeetrisse. Kasutatava optilise kiu läbimõõt on 100 mikromeetrit, pikkus 4m ja see kinnitub mõõtepea ning spektromeetri külge standartsete SMA-905 pistikuga.

### ***Spektromeeter ja termostaat***

Spektromeetrina on kasutusel firma Avantes poolt toodetud mudel AvaSpec-256. Spektromeetri optikaosa, tajur ning juhtelektroonika on paigutatud kompaktsesse korpusesse ning on liidendatud arvutiga RS-232 protokolliga kasutades (spektromeeter on võimalik arvutiga sidestada ka USB-väratit kasutades, kuid lihtsuse ja veakindluse mõttes on antud juhul kasutusel tavaline jadavärat). Spektromeetri optikaskeem on sümmeetriline Czerny-Turner tüüpi. Valgus siseneb kiust läbi standardpistikuga (1), läbib pilu (2) ning kollimeeritakse sfäärilise peegli (3) poolt. Tasaselt holograafiliselt võrelt (4) (600 joont/mm) difrageerunud valgus fokuseeritakse teise sfäärilise peegli (5) poolt ning langeb ühemõõtmelisele jada-kiirgustajurile (7).



Joonis 4. Spektromeetri optikaskeem

Spektromeetri poolt registreeritav lainepikkuste vahemik on 237 kuni 444 nanomeetrit ning lahutusvõime 1 nanomeeter. Kiirgustajurina on kasutusel firma Hamamatsu 256-piksline CMOS jadavastuvõtja. Tajurist loetava signaali digitaliseerimiseks on kasutusel 14 bitine analoog-digitaal muundur. Integreerimisaega on võimalik seada 2-st millisekundist kuni 60 sekundini. Spektromeetri toitepinge on 12V maksimaalne vool 1,25 A.

Pimesignaali vähendamiseks ning signaali temperatuurisõltuvuse kõrvaldamiseks on spektromeeter paigutatud termostaati. Viimane on tavaline, termoelektrilisel põhimõttel töötav portatiivne külmik, mis on ümber ehitatud hoidmaks etteantud temperatuuri. Et jahutamisel ei sõltuks temperatuur külmikus ümbruse temperatuurist, reguleeritakse külmikus oleva temperatuurianduri signaalile vastavalt külmiku tööstükli, hoides temperatuuri  $+7^{\circ}\text{C}$ .

### ***Mõõtesüsteemi arvutijuhtimine***

Operatsioonisüsteemina on kasutusel GNU/Linux. Kuna spektromeetriga kaasas olnud originaaltarkvara ei omanud meie eesmärkide täitmiseks piisavalt funktsionaalsust tuli uus juhtprogramm kirjutada endal. Spektromeetri juhtkäskude teadasaamiseks tuli originaaltarkvara kasutades nõ pealt kuulata arvuti ja spektromeetri vahelist suhtlust. Hiljem avaldas spektromeetri tootnud firma ka avatud lähtekoodiga juhtprogrammi GNU/Linux-i jaoks. See fakt võimaldas kontrollida juhtkäskude süntaksit.

Juhtprogrammi ülesandeks on katiku juhtimine (rööpvärati kaudu), termostaadi temperatuuri kontroll ja mõõtetemperatuuri seadmine (jadavärat), spektromeetri juhtimine (jadavärat) ning mõõdetud spektrite salvestamine relatsioonilisse andmebaasi. Termostaadi juhtloogika on realiseeritud omakorda PIC protsessoriga, mis saab käsked arvutist ning juhib vastavalt termostaadi tööd.

Spektrite registreerimise ajahetked on ette määratavad, toetudes spektromeetri juhtimisarvuti kellale, mis on sünkroniseeritud ajaserveriga, kasutades võrgu ajaprotokolli (NTP). Praegu algab tsükkel iga 15 minuti tagant. Mõõtmistsükkel sisaldab mitme toorspektri (näiteks 2-32) registreerimist hilisema digitaalkujul

summeerimise eesmärgil. Üksiku spektri analoogkujul integreerimise aega korrigeerib juhtprogramm, nii et üheski punktis ei saavutataks küllastumist (16383) ja teiselt poolt, et signaali väärtus ületaks vähemalt 5000 ühiku võrra pimesignaali. Juhul, kui viimane tingimus integreerimisajal ei ole täidetud, spektreid ei registreerita. UV-indeks on sel juhul alla 0,1. Sobiva integreerimisaja valib arvuti adaptiivselt. Selle võimaldamiseks antakse spektromeetritele pidevalt käsklus testspektreid registreerida, analüüsitakse saadud spektrit ning korrigeeritakse vastavalt järgmise spektri integreerimisajaga. Kui saadud spekter on mõnes punktis küllastunud vähendatakse ning kui spektri maksimum on küllastuse piirist liiga kaugel suurendatakse integreerimisajaga. Arvuti jätkab kontrollimist ka öösel. Iga spektri juurde registreeritakse sama integreerimisajaga pimesignaali. Ühe mõõtmistsükli üksikspektrid summeeritakse ning salvestatakse juhtarvutis MySQL andmebaasi. Eeltöötlusena leitakse esimest järku lähend parasiitvalguse iseloomustamiseks. Selleks on keskmine konstantne nivoo, mis saadakse peale pimesignaali mahalahutamist neilt pikslitelt, kuhu ei tohiks langeda kiirgust – 250 nm ümbrus. Hetkel on selle nivoo leidmiseks kasutusel 32 piksli signaal. Samuti arvutatakse eeltöötlemata andmetest UV-indeks ning kogukiiritustihedus UV-A ja UV-B piirkonnas. Viimased on mõeldud orienteeriva hinnangu andmiseks saabuvale kiirgusele.

Spektrite lõpptöötlemisel ja analüüsil vajatakse lisaandmeid valitsenud meteoroloogiliste tingimuste kohta. Suures osas on neid võimalik saada Tõraveres asuvast BSRN (Baseline Surface Radiation Network) meteoroloogiajaamast, kuid vajaka võib jääda pilvkatte hetkeseisundi kirjeldamisest. Katseliselt on praegu seatud spektromeetri mõõteotsku kõrvale üles videokaamera, mille kujutist salvestatakse ja saab jälgida iga mõõtmistsükli juures.

Andmebaasi mootorina on kasutusel MySQL versioon 3 ning see koosneb hetkel neljast tabelist kindla intervalliga registreeritavate spektrite, eelpoolmainitud pidevalt registreeritava spektri, mõõtesüsteemile kehtivate kaliibringute ning mõjuspektrite jaoks. Kindla intervalliga registreeritavate spektrite tabeli struktuur on toodud tabelis 3.

Välja nimetus	Tüüp	Kirjeldus
aeg1	ajatempel	spektri registreerimise algus
aeg2	ajatempel	pimespektri registreerimise algus
expos	täisarv	integreerimisaeg
kordi	täisarv	riistvaralise keskmistamise kasutamine
myra	täisarv	esmane hinnang parasiitvalgusele
L1	täisarv	kehtiva kalibratsiooni nr.
L2	täisarv	temperatuurid spektri registreerimise ajal
L3	täisarv	temperatuurid pimespektri registreerimise ajal
L4	täisarv	arvutatud UV-indeks * 100
L5		
L6	täisarv	integraalne UV-B * 100
L7	täisarv	integraalne UV-A * 100
L8	täisarv	Päikese asukoht spektri registreerimise ajal
pix1	täisarv	esimese piksli signaal
...	...	...
pix256	täisarv	256-nda piksli signaal
L9	täisarv	reserveeritud üldise kvaliteedilipu jaoks
L10	täisarv	reserveeritud kvaliteedilipu jaoks
L11	täisarv	reserveeritud kvaliteedilipu jaoks
L12	täisarv	reserveeritud pilvisuse infole viitamiseks
L13	täisarv	reserveeritud
L14	täisarv	reserveeritud
L15	täisarv	reserveeritud
L16	täisarv	reserveeritud
pim1	täisarv	esimese piksli pimesignaal
...	...	...
pim256	täisarv	256-nda piksli pimesignaal

**Tabel 3. Spektrite salvestustabeli struktuur**

Nagu eelpool mainitud on integreerimisaja määramiseks vaja testspektreid registreerida pidevalt. Et oleks võimalik jälgida mõõtesüsteemi tööd (nt int. aja arvutamist jne) salvestatakse jooksev registreeritud spekter ka andmebaasi (et seda

oleks võimalik hetkeliselt kuvada ning uurida). Selleks on loodud eraldi tabel, mis sisaldab ainult üht rida – viimast registreeritud spektrit. Pideva registreerimise puhul ei mõõdata eraldi pimespektrit vaid pimesignaali leitakse keskmisena nende pikslite signaalist, kuhu valgus ei lange.

Kalibratsioonandmete tabel sisaldab endas mõõtesüsteemi kaliibringu kehtimise algusaega ning kalibreerimiskoeffitsiente iga piksli jaoks ühesekundilise integreerimisaja jaoks. Nagu hiljem selgub on mõõdetud signaal piisavalt lineaarne ning kalibratsioonikordajad ei muutu integreerimisajast. Regulaarsel mõõtesüsteemi kalibreerimisel saadud kordajad salvestatakse tabelisse järjest. Sellisel moel on toorandmetest võimalik arvutada just spektri registreerimise ajal kehtinud kalibreeringule vastavad kiiritustiheduse väärtused säilitades siiski võimaluse uurida ka toorandmeid.

Spektromeetri juhtarvuti on ühendatud observatooriumi arvutivõrku. Kasutajaliides spektrite ja lisaandmete kuvamiseks asub eraldi veebiserveris ning see on realiseeritud PHP keeles kirjutatud veebirakendusena. See võimaldab mõõtmisprotsessi jälgida/kontrollida igast võrku ühendatud arvutist. Spektrite uurimiseks on vaja ainult veebilehitsejat ning Interneti-ühendust. Kasutajaliides koosneb mitmest sektsioonist. Selle abil on võimalik vaadata viimati registreeritud spektrit, lehitseda mistahes ajahetke toor-, füüsikalisi või pimespektreid või mõne mõjuspektriga kaalutud efektiivspektreid, vaadata mõõteseadmete olekut ning labori ja termostaadi temperatuuri väärtusi. Samuti on võimalik jälgida mitme spektrist arvutatava suuruse (UV-A, UV-B, UV-indeksi) väärtusi. Kõik andmed on võimalik esitada kasutajasõbralikul kujul graafikuna, salvestada tabulaatoriga eraldatud või FLEXSTOR formaadis [FMI, 1996]. Eraldi on võimalik kuvada/salvestada andmeid võrdlemiseks Tõravere meteojaamas paikneva kitsasriba-sensoriga CUVB-1.

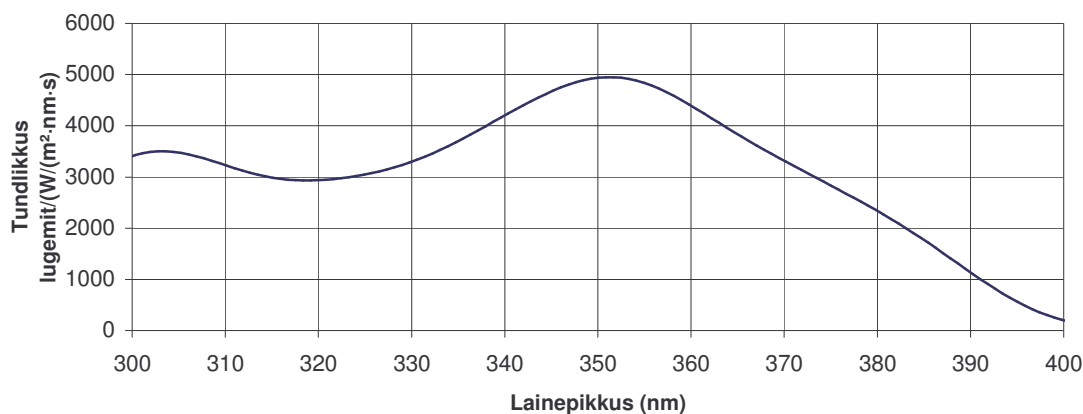
Üksikspektri juurde kuvatakse hulgaliselt lisaandmeid nagu näiteks integreerimisaeg, temperatuurid laboris ning termostaadis ning Päikese kõrgus ning asimuut [Blanco-Muriel jt., 2001] spektri mõõtmise alguses. Samuti teostatakse esialgne kvaliteedikontroll [WMO, 1997 a; WMO, 2003], kasutades paketti CheckUVSpec [Engelsen ja Kylling, 2005] ning kuvatakse selle tulemused. Üksikspektri juurde on

võrdluseks võimalik kuvada ka pilt (selle olemasolul) eelpoolmainitud kaamerast ning TOMS-i poolt mõõdetud osoonikihi paksus [TOMS, 2005].

Mõõdetud spektrite võrdlemisel mudelspektritega on kasutusel libRadtran teekide kogum [Mayer ja Kylling, 2005]. LibRadtran võimaldab, kiirguslevi võrrandi lähenditest lähtudes, mugavalt arvutada kiiritustihedust erinevate atmosfääriparameetrite korral ning võrrelda seda mõõdetuga.

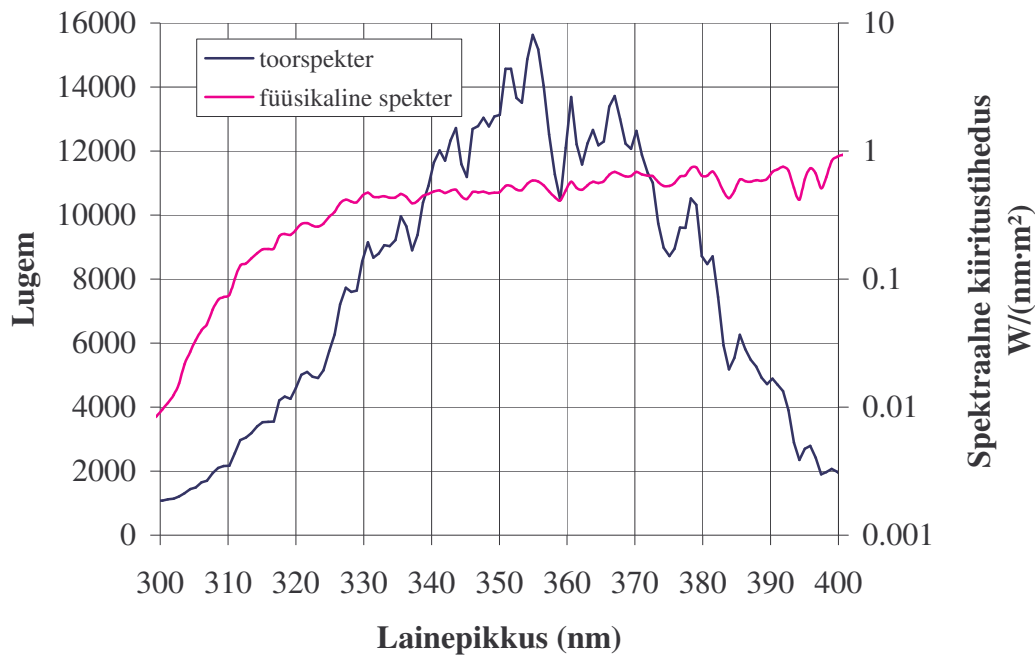
## **Kalibreerimine**

Mõõtetulemuse sidumiseks füüsilise ühikuga kalibreeriti mõõtesüsteem Tartu Observatooriumi optika-metroloogia laboris [Veismann ja Kübarsepp, 2000]. Etalonina on kasutusel NIST-ni jälgitava kalibratsiooniga FEL lamp [ORIEL, 1998]. Lambi poolt 50 cm kaugusel tekitatav spektraalne kiiritustihedus on fikseeritud iga 10 nm tagant, määramatusega 2% UV-A ning 3% UV-B piirkonnas (UV-C piirkonnas suureneb määramatus kahjuks veelgi). Spektromeetri lainepikkuste skaala punktidele vastavad kiiritustihedused leiti kasutades polünoomi. Mõõtesüsteemi lineaarsuse kontrollimiseks korraldati eksperimenti mitmel kaugusel lambist. Selle tulemusena selgus, et mõõtesüsteemi tundlikkus on sellele seatud ülesannete jaoks piisavalt lineaarne ning kalibratsioonikefitsiendid ei vaja integreerimisajast sõltuvat korrigeerimist. Lainepikkused seoti piksli numbriga kasutades elavhõbe-kvartslambi joonspektrit ning interpoleerides kolmanda astme polünoomiga. Süsteemi tundlikkus (õhema hajutajaga) on näitena toodud joonisel 5.



**Joonis 5. Mõõtesüsteemi tundlikkus**

## Registreeritud spekter



Joonis 6. Näide registreeritud spektrist

Joonisel 6 on toodud näitena registreeritud selge taeva spekter (Päikese seniitnurk 38 kraadi) ning sellelt on näha optilise filtri mõju ja Päikese ultraviolettkiirguse registreerimiseks aparatuurilt nõutav dünaamiline piirkond (ka 300 nm juures peab signaal olema kvaliteetne).

## EDUCE kvaliteedinõuded

### Meetodid

Antud meetodika oli juurutatud Euroopa ultraviolettkiirguse andmebaasi juures, mis loodi EDUCE projekti raames, ning adapteeritud kasutuseks ka Tartu Observatooriumis UV spektrite kvaliteedikontrolli skeemis. UV spektrite kontrollimiseks on kasutusel kaks meetodit: Fastrt [Engelsen ja Kylling, 2005] ja SHICrvm [Slaper ja Outer, 2002] arvutused, mille tulemusena saab iga kontrollitav spekter kvaliteedilipu. Viimaseid on viis: ROHELINE (parim), KOLLANE, PUNANE, HALL, MUST (halvim). Esimesed kolm ja MUST näitavad otseselt vastavust spektritele seatud kvaliteedikriteeriumitele (lipuga MUST märgitud spektreid ei kuvata andmebaasi tavapäringutes), HALL lipp tähistab spektreid, mis

tunduvad kahtlased, kuid ei kvalifitseeru korrektselt ühtegi ülalmainitud lipu saajaks. Lipp omistatakse peale konkreetse testi tegemist sõltuvalt testi tulemusest.

Meie UV spektrite andmebaasis hetkel kasutusel ainult esimene meetod. Kasutusel on ka spektri põhilipp, mis iseloomustab spektrit tervikuna. Selleks lipuks võetakse kõige halvem testide lipp. Kui spektromeeter suudab registreerida ROHELISE kvaliteediga spekterid, siis peaks antud mõõteriist vastama S-1 spektraalinstrumentide tüübile.

## **Simulatsioonimeetod Fastrt**

Simulatsiooni käigus arvutatakse Fastrt programmi abil välja kiiritustihedused erinevate atmosfääritingimuste puhul. Tingimusi tähistatakse: MIN, MAX, AERO, CLEA, CLOU.

**MIN:** Simuleeritakse vähimat looduslikku kiiritustihedust, mis eksisteerib väga paksude, homogeenselt jaotunud pilvede korral. Pilvkatte paksuseks on võetud 4 km ja veesambaks  $4000 \text{ g/m}^2$  (pilve optiline paksus 650 lainepikkusel 360 nanomeetrit). Pilvede optilised omadused ühtivad altostratus pilvede omadustega ning veetilgad on ühtlaselt jaotunud kahe ja seitsme kilomeetri kõrgusel. Maapinna peegeldust ei arvestata.

**MAX:** Peale selge atmosfääri läbimist on kiirgus jäänud lõksu lumega kaetud maapinna ja eelmises punktis kirjeldatud altostratus pilvede vahele.

**MAX\_0:** Sarnaneb MAX-le. Erineb aga selles, et paks pilvekiht hajutab ja neelab allapoole suunatud hajuskiirgust.

**AERO:** Kirjeldab pilvitut, kuid sumedat, aerosoolirikast atmosfääri nähtavusega 5 km. Maapind ei peegelda.

**CLEA:** Selge atmosfäär ilma pilvede ja aerosoolita. Maapind ei peegelda.

**CLOU:** Pilvine atmosfäär, mis sarnaneb MAX-ga. Erinevus seisneb pilvede mittehomoogeenses paksuses. Kiiritustihedus saadakse iteratsiooni abil otsides sellist veesamba väärtust, mille tulemusena langeks kiiritustihedus kõige paremini kokku mõõdetud spektriga. Muud sisendparameetrid (päikese seniitnurk jne ...) saadakse mõõdetud spektriga kaasas olevast meta-andmete ploki. Lipukesti antakse järgmiste kriteeriumide kohaselt:

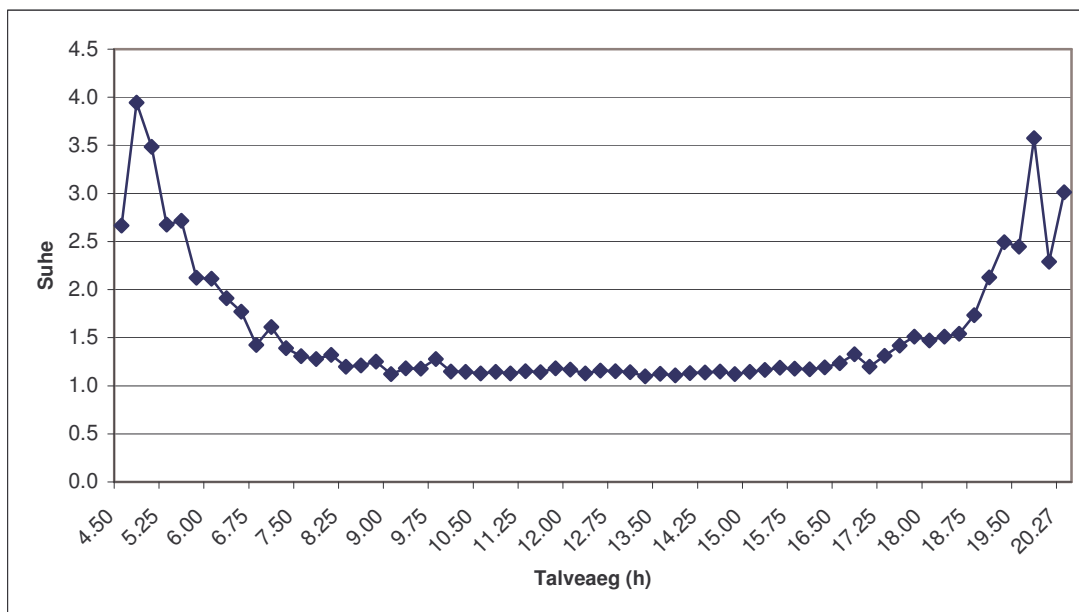
Lipp	Diagnoos	Karakteristik f	m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	sim <sub>1</sub>	sim <sub>2</sub>
HALL	Päikese Seniitnurk määramispiirkonnast väljas					
PUNANE, kui: f < 1.15	Kiiritustihedus liiga väike	$\frac{m_2}{MIN_2}$		m <sub>2</sub>	MIN <sub>2</sub>	
MUST, kui: f > 1.15 PUNANE, kui: 0.85 < f <= 1.15	Kiiritustihedus liiga suur	$\frac{m_2}{MAX_2}$		m <sub>2</sub>	MAX <sub>2</sub>	
KOLLANE, kui: m <sub>2</sub> > MAX <sub>02</sub> muidu ROHELINE	Kiiritustiheduse võimendus	$\frac{m_2 - CLEA_2}{MAX_2 - CLEA_2} (0 > f > 1)$	MAX <sub>02</sub>	M <sub>2</sub>	CLEA <sub>2</sub>	MAX <sub>2</sub>
ROHELINE	Pilvitu taevas	Nähtavus (5-340 km)		M <sub>2</sub>	CLEA <sub>2</sub>	AERO <sub>2</sub>
ROHELINE	CL-NCU	$\frac{M_1}{M_2} - \frac{CLEA_1}{CLEA_2} (f < -0.15)$	m <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	CLEA <sub>1</sub>	CLEA <sub>2</sub>
ROHELINE	NCL-CU	$\frac{M_1}{M_2} - \frac{MIN_1}{MIN_2} (f > 0.15)$	m <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	MIN <sub>1</sub>	MIN <sub>2</sub>
ROHELINE	Pilvine taevas	Veesammas (g/m <sup>2</sup> )		m <sub>2</sub>		

Tabel 4. Diagnostika tööriista Atmospheric signature väljund. m<sub>1</sub> ja m<sub>2</sub> on mõõdetud karakteristikud vastavalt UV-A piirkonna alumises ja ülemises osas. Indeksid 1 ja 2 suurustel MIN, MAX, AERO ja CLEA näitavad simulatsioonist saadud tulemusi vastavalt UV-A alumises ja ülemises osas. Andmete puudumist tähistab väärtus -99999.99

## 4 Spektrite usaldatavuse analüüs

### Võrdused kitsasriba-sensoriga CUVB1

Saadud spektrite usaldatavuse kontrollimiseks sai Tartu-Tõravere meteojaamast hangitud firma Kipp & Zonen kitsasriba sensori CUVB-1 mõõtmiste andmed. Sensor on termostateeritud  $+40^{\circ}\text{C}$  juures, mõõdab spektraalset + kiiritustihedust  $306 \pm 0.2$  nm juures ning omab ribalaiust  $2 \pm 0.5$  nm. Võrdluseks valisin suhteliselt selge päeva – 18.07.2004. Spektromeetri andmetega võrdlemiseks tuli viimaseid kaaluda CUVB1 tundlikkuse kõveraga ning keskmistada, et mõõdetud suurused oleksid identsed. CUVB-1 andmed on saadud kasutades tehase-kalibratsiooni. Tulemused on esitatud joonisel:



Joonis 7. Spektromeetri ja CUVB1-e signaalide suhe

Graafikut vaadates võib välja tuua kaks häirivat faktorit: süstemaatiline erinevus suuremal osal päevast (10 – 15 %) ning hälbe suurenemine õhtul ja hommikul. Süstemaatiline kõrvalekalle on seletatav faktiga, et viies läbi sensori CUVB1 kontrollkalibratsiooni Tartu Observatooriumi optika-metroloogia laboris ilmnes saadud tulemuse erinevus seadme tehase-kalibratsioonist tuletatuga 9,5 % (kohalikku etaloni kasutades olid seadme näidud väiksemad, kui tehase kalibratsiooni kasutades). Õhtune ja hommikune suurem hälve toob aga välja seadmete konstruktsioonierinevused, eelkõige hajutite koosinuskarakteristikute erinevused

suurtel seniitnurkadel. Viimasele kvantitatiivse hinnagu andmist takistab fakt, et CUVB-1 koosinuskarakteristik ei ole mulle teada.

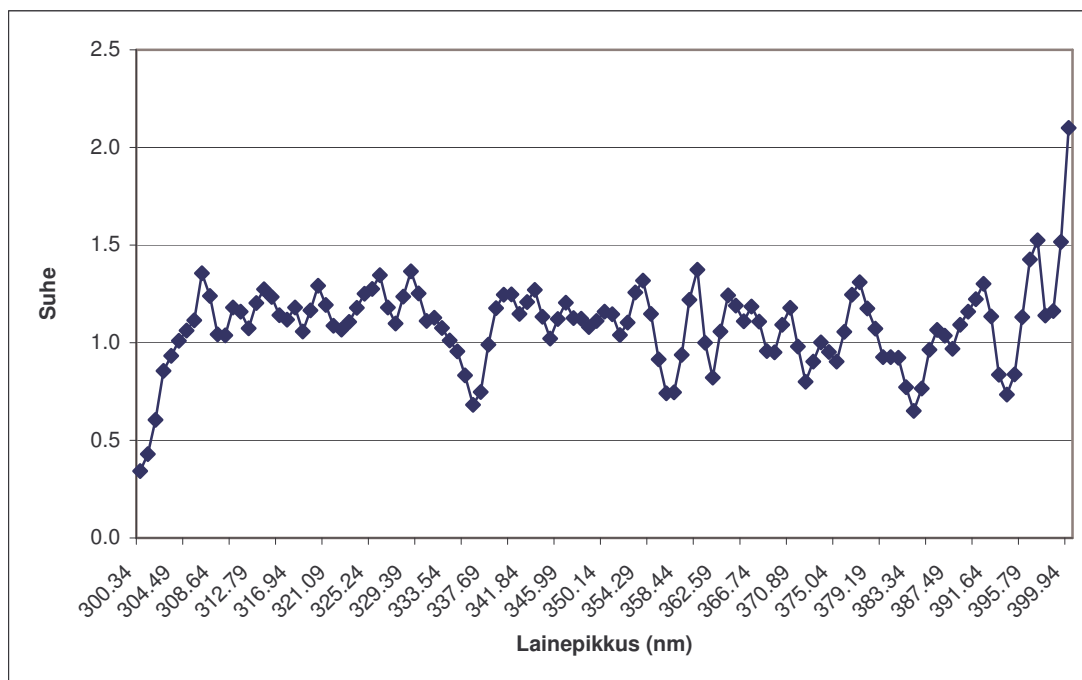
### ***Võrdlused modelleeritud spektritega.***

Mudelspektritega võrdlemisel olen kasutanud teekide kogumit libRadtran. Mudelarvutused baseeruvad kiirguslevi võrrandi lahendamisel andtud atmosfääritingimuste korral. Võrrandi lahendamisel on kasutusel DISORT algoritm [Stamnes jt., 1988]. Võrreldav spekter oli registreeritud 18. juulil 2004 kell 14.00. Andmed osoonikihi paksuse kohta pärinevad TOMS-st. Sisendparameetrid on toodud tabelis Y. Tegemist on pilvitu teava mudeliga, kus ei arvestatud eraldi ka aerosoole.

Atmosfääri profiil	U.S standardatmosfäär 1976 [AFGL, 1976]
Päikese spekter (ülalpool atmosfääri)	ATLAS3 nihutatud lainepikkustele õhus [ATLAS, 1996]
Osoonikihi paksus	315 DU
Albedo	0.2
Lainepikkused	250 – 401 nm
Spektromeetri aparaatfunktsioon	Kolmnurkne, FWHM 2nm

**Tabel 5. Spektri modelleerimisel kasutatud sisendparameetrid**

Joonisel 8 on esitatud arvutatud ning mõõdetud keskmiste spektraalsete kogukiiritustiheduste suhe.



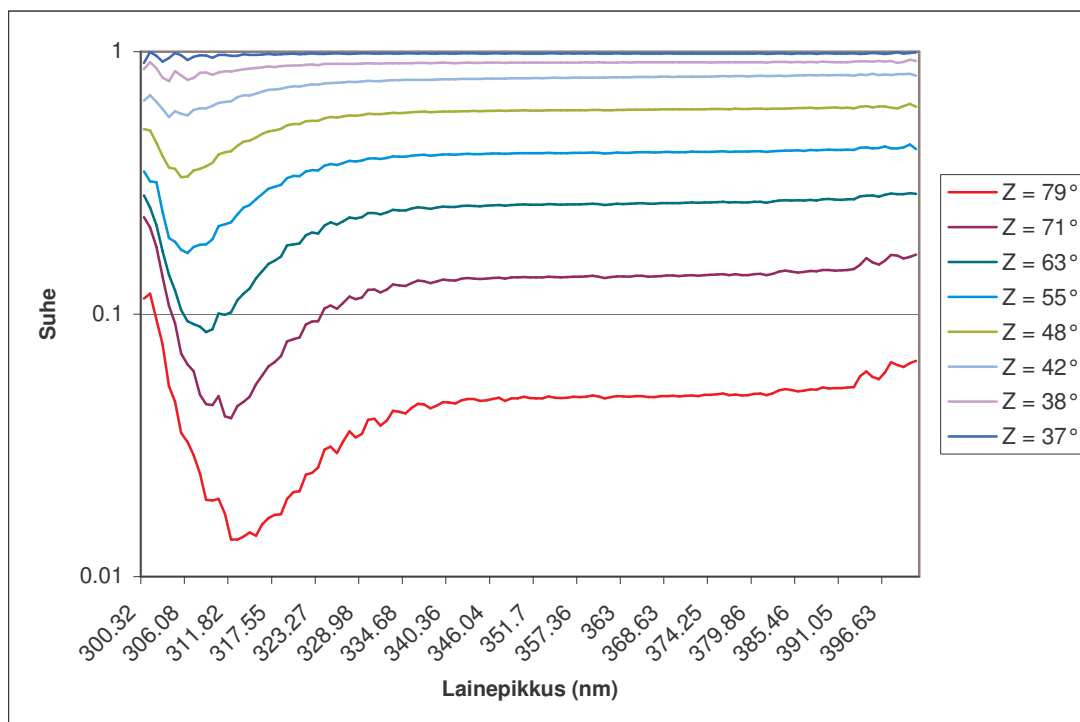
**Joonis 8. Mudelarvutustest saadud ja mõõdetud kiiritustiheduste suhe**

Lühemate lainepikkuste piirkonnas ilmnev selge lahknevus mõõdetud ja arvutatud kiiritustiheduste vahel on sletatav parasiitvalgusega spektromeetris. Viimase iseloom vajab kindlasti edasist süvendatud uurimist. Süstemaatilist hälvet ülejäänud spektris on võimalik selgitada kalibreerimiseks kasutatud etalonkiirguri vananemiseefektidega ning suuremaid hälbeid faktiga, et mudelarvutustes oli kasutusel ainult piiratud hulk sisendparameetreid (mudelarvutustes ei esine kõiki neeldumisribasid).

### ***Suhtespektrite kasutamine***

Spektrite kvaliteedikontrolli teostamiseks on võimalik kasutada suhtespektreid [Bernhard jt., 1988]. Selle meetodi korral uuritakse ühe spektromeetri produktsiooni (spektreid) suhteid sama instrumendi poolt registreeritud võrdlusspektriga. Tavaliselt, nagu ka käesolevas töös, on võrdlusspektrina kasutusel keskpäeval registreeritud spekter. Ideaaljuhul on suhted siledad ning võimaldavad esile tuua instrumentaalseid iseärasusi. Seega on saadud suhted on heaks kvaliteedikontrolli vahendiks andmehõive vigade ning, sõltuvalt spektromeetri lahutusvõimest, lainepikkuste skaala nihete detekteerimisel. Samuti võib suhete varal välja tuua registreeritud spektrite usaldatavuspiirkonnad. Loomulikult on saab seda meetodit kõige hõlpsamini rakendada selge taeva korral. Kiirelt muutuva pilvisuse puhul on rakendamine raskem ning kasutada tuleks võrdluseks keskmistatud spektreid või spektraalseid päevadoose.

Järgnevad suhtespektrid on registreeritud 18. juulil 2004 ning arvutuslikult on neid korrigeeritud ainult parasiitvalguse suhtes esimeses lähenduses.



Joonis 9. Suhtelised spektrid (Z – Päikese seniitnurk)

Graafikult on võimalik leida esimeses lähenduses usaldatav piirkond spektraalmõõtmiseks (arvestades Päikese spektri iseärasusi nagu tugev neelamine osooni poolt UVC piirkonnas jne). Seega ilma korrigeerimiseta võib esimeses lähenduses usaldusväärseks lugeda piirkonna (halvimal juhul, kui Päikese seniitnurk on ~80 kraadi) 313 – 400 nm. Nagu graafikult näha see piirkond suureneb päeva jooksul. Vastavalt 313-st lühematel ja 400-st suurematel lainepikkustel kahandab kaliibringu suurenev määramatus ning parasiitvalgus mõõtmiste usaldatavust. Samas tuleb muidugi märkida, et hommikused, kõige suurema veaga spektrid, annavad loomulikult väga väikese osa erinevatesse summadesse (näiteks kell 5:30 oli UV-indeks 0,09, samas kell 11:30 oli see 4,58). Vahemikus 310 kuni 340 nm on selgesti näha osooni neeldumisristlõike struktuuri muutused päeva jooksul. Nendest muutuste varal, kasutades diferentsiaalset optilist neeldumisspektroskoopiat (DOAS), on võimalik välja arvutada ka osoonikihi paksus analoogiliselt juba aastaid kasutuses olnud NO<sub>2</sub> ja osooni hulkade mõõtmiseks spektri violetses osas hämariku ajal [McMahon ja Simmons, 1980].

Tingituna ramani hajumisest  $O_2$  ja  $N_2$  molekulide osavõtul atmosfääris kahaneb Fraunhoferi joonte sügavus (Ring'i efekt [Grainger ja Ring, 1962]) seniitnurga suurenedes. Protsess toimub, kui elektrivälja ja pöörleva molekuli interaktsioonist tingitult hajutatakse kiirgust sageduse muutumisega [Fish ja Jones, 1995]. Kõige paremini on Ring'i efekti tõttu Fraunhoferi joonte täitumine märgatav tugevate joonte 393 ja 397 nm (kaltsiumi dublett) juures. Suuremate Päikese seniitnurkade juures suureneb sedamoodi hajunud kiirguse osakaal ning Ring'i efekt tõuseb esile. See viibki kahe väikese piigi tekkimisele ka antud graafikul esitatud suhtespektrites 393 ja 397 nm juures. See omakorda annab kinnitust lainepikkuste skaala adekvaatsusele.

Ühtlasi on eelnenud analüüsist võimalik järeldada, et spektraalandmete usaldatavuspiirkonna piirid (lainepikkuste mõttes) on registreeritud andmetest üheselt määratavad (iga spektri jaoks eraldi). Andmete täpsusklassi edasiseks suurendamiseks on mitmeid võimalusi. Esiteks on spektromeeter soovitatav termostateerida madalamal temperatuuril (parem signaal/müra suhe) ning jätkata kahe erineva paksusega hajuti kasutamist. Kogemused näitavad, et mõõtesüsteemi ülesseadmisel tuleb rakendada ka vastumeetmeid lindude suhtes, kes tahavad kasutada mõõteotsikut istumisalusena. Samuti vajab sügavamalt uurimist parasiitvalguse probleem (kõrjemat järku lähendused, parasiitvalguse mõõtmine). Arvutislikult tuleks edasiselt rakendada koosiniskorrektiooni hajuti mitteideaalse geomeetria kõrvaldamiseks. Suurem vajadus sellks on loomulikult talviste mõõtmiste puhul.

## Kokkuvõte

Käesoleva töö raames on Tartu Observatooriumis tööle rakendatud uus ultraviolettkiirgust registreeriv spektromeeter, välja arendatud mõõtesüsteem UV-spektrite regulaarseks salvestamiseks ning kasutajaliides spektraalse info kuvamiseks ning edasiseks analüüsiks. Mõõtesüsteem koosneb järgmistest komponentidest:

1. mõõtepeast (sisaldab optilist filtrit) ning elektromehaanilisest katikust,
2. spektriomeetrist,
3. termostaadist,
4. tarkvarast juhtarvutis,
5. kasutajaliidese.

Mõõteotsik ning registreerimistarkvara on välja arendatud kohapeal. Termoelektrilisel põhimõttel töötav termostaat ehitati ümber arvutijuhitavaks ning mugandati spektromeetri hoidmiseks. Registreeritud spektrite salvestamiseks on välja töötatud sobilik andmebaasi struktuur. Kasutajaliidest luues on silmas peetud modulaarsust ning kasutusmugavust.

Tartu Observatooriumis üles seatud mõõtesüsteem registreerib 15-minutilise intervalliga UV-spektreid alates üheteistkümnendast juulist 2004. Töös on toodud süsteemi komponentide ning kasutajaliidese kirjeldus ning võrreldud registreeritud andmeid Tartu-Tõravere meteojaamas paiknevate UV sensorite produktsiooni ning mudelarvutustega. Ülevaade töö tulemustest esitati postrina konverentsil Nordic Ozone Group Annual Meeting 2005, mis toimus 7 – 8 aprillil 2005. a. Islandil Reikjavikis.

Magistrantuuri ajal esinesin 9-ndal septembril 2004 Türi toimunud VII keskkonnakaitse alasel nõupidamisel “Atmosfäär. Inimene. Ultraviolettkiirgus.” suulise ettekandega. Samuti osalesin uue eriteemse UV sensori ülesseadmisel ning koostasin laiemale publikule mõeldud veebilehe aadressiga <http://sputnik.aai.ee/>. Viimane sisaldab reaajas esitatavat (eelpool mainitud sensoriga mõõdetud) UV-indeksi väärtust, päevast käiku ning populaarteaduslikke materjale UV-kiirguse, osoonikihi ning päevitamise kohta.

## **Kasutatud kirjandus**

AFGL, (1976) AFGL atmospheric constituent profile. U.S. standard atmosphere. (AFGL-TR-86-0110).

Bais, A. F., Zerefos, C. Z., Meleti, C., Ziomas, I. C., Tourpali, K., (1993) Spectral Measurements of Solar UVB Radiation and its Relations to Total Ozone, SO<sub>2</sub>, and Clouds. *J. Geophys. Res.*, 98(D3), 5199–5204.

Bernhard, G., Booth, C. R., McPeters, R. D., (2003) Calculation of total column ozone from global UV spectra at high latitudes. *J. Geophys. Res.*, 108(D17).

Bernhard, G., Seckmeyer, G., (1997) New Entrance Optics for Solar Spectral UV Measurements. *Photochemistry and Photobiology*, 65(6), 923–930.

Bernhard, G., Seckmeyer, G., (1999) Uncertainty of measurements of spectral solar UV irradiance. *J. Geophys. Res.*, 104(D12), 14321–14345

Bernhard, G., Seckmeyer, G., McKenzie, R. L., Johnston, P.V., (1998) Ratio spectra as a quality control tool for solar spectral UV measurements. *J. Geophys. Res.*, 103(D22), 28855 – 28861.

Blanco-Muriel, M., Alaracon-Padilla, D. C., Lopez-Moratalla, T., Cara-Coira, M., (2001) Computing the solar vector. *Solar Energy*, 70, 431–441.

Engelsen O., Kylling A., (2005) Fast simulation tool for ultraviolet radiation at the Earth's surface. *Optical Engineering*, 44(4), 041012.

Feister, U., Grewe, R., Gericke, K., (1997) A method for correction of cosine errors in measurements of spectral UV irradiance. *Solar Energy*, 60, 313–332.

Fish, D. J., Jones, R. L., (1995) Rotational Raman scattering and the ring effect in zenith-sky spectra. *Geophys. Res. Lett.*, 22(7), 811–814.

FMI, (1996) The FLEXSTOR file format.

[[http://www.ozone.fmi.fi/Archive/flexstor/flexstor\\_current.html](http://www.ozone.fmi.fi/Archive/flexstor/flexstor_current.html)]

Kaye, J. A., Miller, T. L., (1996) The ATLAS series of shuttle missions. *Geophys. Res. Lett.*, 23(17), 2285–2288.

Kostkowski, H. J. (1997) *Reliable Spectroradiometry*. 609 pp., Spectroradiometry Consulting, La Plata, Maryland, USA.

Grainger, J. F., Ring, J., (1962) Anomalous Fraunhofer line profiles. *Nature*, 193, 762.

Leszczynski, K., *Advances in traceability of solar ultraviolet radiation measurements*. 78 pp., STUK-A189, Helsinki.

Lätt, S., (2003) *Päikese ultraviolettkiirguse spektromeetria*, 41 pp., Bakalaureusetöö, Tartu Ülikool.

Mayer, B., Kylling, A., (2005) Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 5, 1319–1381.

McMahon, B. B., Simmons, E. L., (1980) Ground based measurements of atmospheric NO<sub>2</sub> by differential optical absorption. *Nature*, 287, 710–711.

ORIEL Instruments (1998) *Report of Calibration of One Standard of Spectral Irradiance (250 – 2400 nm)*.

Slaper, H., Outer, P., (2002) *Analysis of spectral wavelength shifts, spectral anomalies, spectral resolution and calculation of weighted UV-doses by means of the software package SHICrvm*. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.

Stamnes, K., Tsay S. C., Wiscombe, W., Jayaweera, K., (1988) Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media. *Applied Optics*, 27, 2502.

Zerefos, C.S., Bais, A.F., (1997) Solar ultraviolet radiation: modelling, measurements and effects. 333 pp., Springer.

TOMS (2004) Total Ozone Mapping Spectrometer. [<http://toms.gsfc.nasa.gov/>]

Veismann, U., Eerme, K., Ansko, I., Lätt, S., (2005) Solar UV-spectrometry with a miniature fiber optic spectrometer. Nordic Ozone Group Annual Meeting 2005 poster session, Reykjavik Iceland.

Veismann, U., Kübarsepp, T., (2000) Stability monitoring of radiometric standard lamp using solar blind phototube. *BEC-2000 Proc*, 281–284.

Webb, A.R. (1998) UVB Instrumentation and Applications. 101 pp., Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam.

WHO/WMO/UNEP/ICNRP (2002) Global Solar UV index: a practical guide. WHO, Geneva, Switzerland.

WMO (2003) Quality assurance in monitoring solar ultraviolet radiation: the state of the art. 45 pp., WMO-GAW, No. 146.

WMO (1997) Guidelines for Site Quality Control of UV Monitoring. 39 pp., WMO-GAW, No. 126.

WMO (1997) Instruments to Measure Solar Ultraviolet Radiation, Part 1: Spectral instruments. 30 pp., WMO-GAW, No. 125.

# **SOLAR ULTRAVIOLET SPECTROMETRY**

## **Summary**

Measurements of solar ultraviolet radiation have been in increasing demand since the announcement of an Antarctic ozone hole in 1985. Loss of stratospheric ozone, attributed to the action of man-made chlorofluorocarbons, has since been observed in the atmosphere above much of the Earth's surface. Ozone absorbs short wavelength UV radiation, and it is the potential effects of extra UV, resulting from ozone depletion, that has led to an upsurge of interest in UV radiation.

Thesis "Solar ultraviolet spectrometry" gives a description of the measurement system for periodically registering solar UV-spectra in Tartu Observatory and does a comparison of the data acquired with a narrowband detector from near-by Tartu-Tõravere BSRN station and model calculations. During course of this work a laboratory-grade spectrometer from Avantes (Avaspec-256) was purchased and a measurement system, for acquiring global ultraviolet spectra, was set up in Tartu Observatory. The system consists of custom-made input optics, thermostat, spectrometer and of a control computer. Input optics and control software were developed locally. The measured spectra are saved to a relational database. All data regarding measurements can be viewed and processed using a simple web-interface. Regular, with 15 minute interval, recording of spectra started in July 2004 and is continuing as we speak.