

TARTU ÜLIKOOL
Füüsika-keemiateaduskond
Keskkonnafüüsika instituut

Martin Kannel

ATMOSFÄÄRIAEROSOOI SPEKTRAALSE OPTILISE PAKSUSE MODELLEERIMINE

3+2 magistritöö rakendusfüüsikas

Juhendaja: dots Hanno Ohvri

Tartu 2007

SISUKORD

SISSEJUHATUS	3
1. ATMOSFÄÄRIOPTIKA MÕISTEID	4
2. AEROSOOI OPTILISE PAKSUSE VALEMI TULETAMINE	10
2. 1. Moskva Ülikooli mudel	10
2. 2. Moskva Ülikooli mudeli teisendamine	12
2. 2. 1. Parametriseerimine sisendsuuruste α , p_2 ja W korral	12
2. 2. 2. Parametriseerimine sisendsuuruste α , BAOD ja W kaudu	14
2. 3. AOD arvutusmudeli arendamine	16
2. 3. 1. Võrdlusmeetodid	16
2. 3. 2. Hajuskiirguse arvestamine	17
2. 3. 3. Probleemsed aastad 2003 ja 2005	19
3. MUDELI KONTROLL JA ANALÜÜS	21
3. 1. Võrdlus Moskva Ülikooli originaalmudeliga	21
3. 2. Võrdlus AERONET vaatlustega	24
3. 3. Võrdlus Gueymardi mudeliga	27
4. TÖÖ JÄRELDUSED	29
Tänuavaldused	31
Summary	32
Kasutatud kirjandus	33
Lisa 1. Moskva Ülikooli AOD550 arvutusmudeli abifunktsioonid ja väärtused	34
Lisa 2. Kümne suurima hälbega mõõtmispunktide koondtabel kuuest AOD500 piirkonnast	35
Lisa 3. Meie mudeli lühivalemid fikseeritud Ångströmi eksponendi korral	37

SISSEJUHATUS

Alustades kahe aasta eest käesolevat magistritööd, oli eesmärgiks koostada võimalikult lihtne valem kogu atmosfäärikihi (atmosfäärisamba) aerosooliosakeste spektraalse optilise paksuse AOD_λ (Aerosol Optical Depth) arvutamiseks atmosfääri integraalse läbipaistvuskoeffitsiendi ja atmosfääri veeaurusisalduse kaudu.

Valemi aluseks võtsime Moskva Ülikoolis koostatud **AOD550** mudeli, mida lihtsustasime ja korrigeerisime parema kokkulangemise eesmärgil Tõraveres asuva AERONET fotomeetri mõõtmistega. Moskva Ülikooli mudeli lainepikkuse $\lambda = 550 \text{ nm}$ asendasime lainepikkusega $\lambda = 500 \text{ nm}$, et võrrelda mudelit Tõravere AERONET mõõtmistega.

Püstitatud ülesanne õnnestus täita. Järk-järgult jõudsimme valemini, mille alusel arvatud **AOD500** väärtused korreleeruvad väga hästi AERONET mõõtmistega Tõraveres aastatel 2002–2006 (kokku **10 113** üksikmõõtmist, arvatud ja mõõdetud **AOD** vaheline determinatsioonikoefitsient $R^2 = 0.96$).

Töö tulemused on kasutatavad:

- spektraalse **AOD** arvutusteks integraalse otsekiirguse alusel, sellised lähendarvutused on vajalikud AOD aegridade koostamiseks või pikendamiseks olukorras, kus spektraalse AOD mõõtmised pole olnud võimalikud;
- spektraalse **AOD** mõõtmistulemuste kontrolliks paralleelsete integraalsete otsekiirguse mõõtmiste kaudu.

Magistritöö tulemused on autori poolt ette kantud rahvusvahelisel konverentsil *Visibility, Aerosols & Atmospheric Optics*, Viini Ülikoolis 2006, ning Eesti II Kaugseireiseminaril, Tõraveres 2005.

Tulemused on esitatud kahes teaduspublikatsioonis:

- Kannel, M., Ohvril, H., Okulov, O., Teral, H. (2006) A simple broadband parameterisation of spectral aerosol optical depth. In: *Conference on Visibility, Aerosols, and Atmospheric Optics*, p. 36. Vienna, Austria;
- Kannel, M., Ohvril, H., Teral, H., Russak, V., Kallis, A. (2007) A simple broadband parameterisation of columnar aerosol optical thickness. *Eesti Teaduste Akadeemia Toimetised. Ökoloogia*, **56/1**, 57-68.

1. ATMOSFÄÄRIOPTIKA MÕISTEID

Solaarkonstant

Solaarkonstant on Päikese energia, mis jõuab Maa atmosfääri ülemisele piirile kiirtega risti olevale pinnahelikule ajaühikus Maa–Päike keskmisel kaugusel. Üle kõikide lainepikkuste integreerides omab solaarkonstant praegu WMO tunnustatud väärtust (Lenoble, 1993):

$$S_0^* = 1.367 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}. \quad (1.1)$$

Seda väärtust saab määrata ka maapealselt, kasutades Bouguer–Langley meetodit, mis seisneb erinevatel Päikese kõrgustel mõõdetud päikese kiirguse ekstrapoleerimisel olukorranis kus atmosfäär puudub (Lenoble, 1993). Solaarkonstanti määratakse ka satelliitmõõtmiste kaudu. Tegelikult aga ei ole termin *solaarkonstant* korrektne, kuna rangelt võttes ei ole Päike stabiilne kiirgaja. Solaarkonstandi väärtus on alates 1979. aastast kõikunud **0.1%** piires. WMO väärtuse kõrval kasutatakse ka teisi ligilähedasi väärtuseid, näiteks **1.369 kW/m²** (Bohren and Clothiaux, 2006) ja **1.365 kW/m²** (Jacobson, 2005). Solaarkonstant varieerub Päikese 11-aastase tsükli vältel $\pm 1 \text{ W/m}^2$.

Maa atmosfääri ülapiirile langev Päikese kiirguse kiiritustihedus on võrdne solaarkonstandiga ainult kahel kuupäeval aastas – 04. aprillil ja 05. oktoobril. Nendel kuupäevadel on Maa–Päike hetkeline kaugus R võrdne oma keskväertusega R_0 ehk ühe astronoomilise pikkusühikuga **1 AU**:

$$R_0 = 1 \text{ AU} = 1.496 \cdot 10^{11} \text{ m} \approx 150 \cdot 10^6 \text{ km}. \quad (1.2)$$

Teistel kuupäevadel aastas leitakse Päikese kiiritustihedus S_0 atmosfääri ülapiiril seosest:

$$S_0 = S_0^* \frac{R_0^2}{R^2}. \quad (1.3)$$

Minimaalne Maa–Päike kaugus on 03. jaanuaril:

$$R_{\min} = 1.471 \cdot 10^{11} \text{ m},$$

maksimaalne on Maa–Päike kaugus 04. juulil:

$$R_{\max} = 1.521 \cdot 10^{11} \text{ m}.$$

Maa–Päike **maksimaalse kauguse** suhe **kauguse keskväertusesse** ning seega solaarkonstandi ning minimaalse kiiritustiheduse suhe avaldub valemi (1.3) järgi:

$$\frac{R_{\max}}{R_0} = 1.0167 \Rightarrow \left(\frac{R_{\max}}{R_0} \right)^2 = \frac{S_0^*}{S_{\min}} = 1.0337 .$$

Maa-Päike **minimaalse kauguse** suhe **kauguse keskväärtusesse** ning solaarkonstandi ja maksimaalse kiiritustiheduse suhe avaldub:

$$\frac{R_{\min}}{R_0} = 0.9833 \Rightarrow \left(\frac{R_{\min}}{R_0} \right)^2 = \frac{S_0^*}{S_{\max}} = 0.9668 .$$

Seega kiiritustiheduse erinevus Maa maksimaalsel kaugusel on **3.37%**, minimaalsel kaugusel aga **3.32%** keskväärtusest. Minimaalse ja maksimaalse Päikese kiiritustiheduse suhe avaldatuna kauguste kaudu:

$$\frac{R_{\min}}{R_{\max}} = 0.9671 \Rightarrow \left(\frac{R_{\min}}{R_{\max}} \right)^2 = \frac{S_{\max}}{S_{\min}} = 0.9353 ,$$

millest järeldub, et Päikese kiiritustihedus võib aasta jooksul erineda kuni **6.47%**. Lõunapoolkera atmosfääri suurem maksimaalne kiiritustihedus kompenseeritakse põhjapoolkera pikema suvega. Kevade ja suve kogu pikkus põhjapoolkeral on **186.45** ööpäeva, lõunapoolkeral **178.80** ööpäeva (Matveev, 1984).

Optiline mass

Atmosfääri optiline mass ehk optiline massiarv m näitab mitu korda on mingisuguse nurga all kaldu asuva, ühikulise ristlõikega atmosfäärisamba mass M suurem kui seniitudisunalise atmosfäärisamba mass M_0 :

$$m = \frac{M}{M_0} . \quad (1.4)$$

Harilikult mõeldakse massi M normaalingimustel ja merepinna kõrgusel asuva vaatleja jaoks. Tasaparalleelse atmosfäärimudeli korral on massiarv mistahes Päikese kõrguste jaoks

$$m = \frac{1}{\sinh} = \frac{1}{\cos Z} , \quad (1.5)$$

h tähistab Päikese kõrgusnurka, $Z = 90^\circ - h$ Päikese nurkkaugust seniidi suunast (seniitkaugust). Sõltuvalt uuritavast probleemist on tasaparalleelne atmosfäärimudel kasutatav Päikese seniitkaugusteni $Z = 60^\circ$. Suuremate seniitnurkade (horisondilähedasema Päikese) korral tuleb arvestada Maa atmosfääri sfäärilisust.

Optiline läbitavus

Atmosfääri spektraalne optiline läbitavus τ_λ on tegur, mis iseloomustab atmosfääri ülapiirile langetava Päikese spektraalse otsekiirguse $S_{\lambda 0}$ suhtelist nõrgenemist atmosfääris:

$$S_\lambda = \tau_\lambda S_{\lambda 0}, \quad (1.6)$$

kus S_λ on aluspinnani jõudnud Päikese otsekiirguse spektraalne kiiritustihedus kiirtega risti olevale pinnale. Otsekiirguse all mõeldakse Päikese ruuminurgast saabunud kiirgust.

Käesolevas töös jaotame atmosfääri optilised läbitavused päikesekiirguse nõrgenemise modelleerimisel kiirgust nõrgendava aine (substantsi) järgi kolme gruppi:

- ideaalse ehk puhta ja kuiva atmosfääri (**Clean and Dry Atmosphere**) optiline läbitavus $\tau_{\lambda, \text{CDA}}$,
- veeauru optiline läbitavus $\tau_{\lambda, \text{w}}$,
- aerosooliosakeste kihi optiline läbitavus $\tau_{\lambda, \text{aer}}$.

Ideaalses atmosfääris toimuva kiirguse nõrgenemise üks põhjus on molekulaarne ehk Rayleigh hajumine (võrdeline λ^{-4} -ga), vastav optiline läbitavus $\tau_{\lambda, \text{R}}$.

Atmosfääri põhigaasid, (**N₂**, **O₂**, **Ar** jne) neelavad päikesekiirgust vähe, mistõttu nendes gaasides kiirguse neeldumist ei arvestata.

Ideaalse atmosfääri peamised muutlikud komponendid (**O₃**, **NO₂**, **CO₂**, **CH₄**), koosnedes kolme- ja enama-aatomilistest molekulidest, neelavad vähesel määral päikesekiirgust. Atmosfääri muutlike komponentide läbitavus kokku (ilma osoonita):

$$\tau_{\lambda, \text{g}} = \tau_{\lambda, \text{NO}_2} \tau_{\lambda, \text{CO}_2} \tau_{\lambda, \text{CH}_4}. \quad (1.7)$$

Ideaalse atmosfääri kogu spektraalne optiline läbitavus on määratud kolme teguri korrutisega (on multiplikatiivne):

$$\tau_{\lambda, \text{CDA}} = \tau_{\lambda, \text{R}} \tau_{\lambda, \text{g}} \tau_{\lambda, \text{O}_3}. \quad (1.8)$$

Spektraalsete optiliste läbitavuste käsitlemine multiplikatiivsetena, on samaväärne substantside või protsesside ümberpaigutamisega üksteise peal paiknevateks kihtideks. Maa reaalse atmosfääri spektraalse optilise läbitavuse võib väljendada:

$$\tau_\lambda = \tau_{\lambda, \text{CDA}} \tau_{\lambda, \text{w}} \tau_{\lambda, \text{aer}}. \quad (1.9)$$

Sobiv on kasutada ka reaalse atmosfääri integraalse optilise läbitavuse väljendamiseks samasugust vormi nagu spektraalse läbitavuse korral (Gueymard, 1998):

$$\tau = \tau_{\text{CDA}} \tau_w \tau_{\text{aer}}. \quad (1.10)$$

Aluspinnani jõudnud integraalse otsekiirguse kiiritustihedust väljendame seega samuti korru-
tisenä

$$S = \tau_{\text{CDA}} \tau_w \tau_{\text{aer}} S_0 = \tau S_0, \quad (1.11)$$

kus üldine nõrgenemistegur τ sõltub Päikese kõrgusest (massiarvust), arvestab kõiki õhu koostis-
osi ning mõlemat nõrgenemisprotsessi, hajumist ja neeldumist.

Optiline paksus

Atmosfääri optiline paksus δ on kiirguse eksponentsiaalse nõrgenemisvalemi astendajas olev
tegur. Sellise nõrgenemise korral, avaldub aluspinnani jõudnud otsekiirgus (piirdume integraalse
kiirgusega):

$$S = S_0 \exp(-\delta m), \quad (1.12)$$

$$\tau S_0 = S_0 \exp(-\delta m),$$

$$\tau = \exp(-\delta m),$$

$$\delta = -\frac{1}{m} \ln \tau, \quad (1.13)$$

kus m on optiline mass ja τ optiline läbitavus. Samamoodi nagu optiliste läbitavustega, erista-
takse ka optilised paksused atmosfääri eri osade jaoks erinevalt:

- ideaalse atmosfääri optiline paksus δ_{CDA} ,
- veeauru optiline paksus δ_w ,
- aerosooliosakeste kihi optiline paksus δ_{aer} .

Optilise läbitavuse multiplikatiivsusest järeldub optilise paksuse aditiivsus:

$$\begin{aligned} \delta &= -\frac{1}{m} (\ln \tau) = -\frac{1}{m} (\ln \tau_{\text{CDA}} \tau_w \tau_{\text{aer}}) = -\frac{1}{m} (\ln \tau_{\text{CDA}} + \ln \tau_w + \ln \tau_{\text{aer}}) = \\ &= -\frac{1}{m} \ln \tau_{\text{CDA}} - \frac{1}{m} \ln \tau_w - \frac{1}{m} \ln \tau_{\text{aer}} = \\ &= \delta_{\text{CDA}} + \delta_w + \delta_{\text{aer}}. \end{aligned} \quad (1.14)$$

Integraalse kiirguse korral sõltub optiline paksus Päikese kõrgusest. Madalatel Päikese kõrgustel
(suurtel massiarvudel) on aluspinnani jõudnud kiirguses rohkem pikemaid lainepikkusi, mis
nõrgenevad (hajuvad) vähem ja läbivad atmosfääri paremini. Seega madalatel Päikese kõrgustel

määratud integraalsed optilised paksused on väiksemad, optilised läbitavused massiarvu kohta suuremad. Seda nähtust nimetatakse Forbes'i efektiks (Mürk, 1967).

Ångströmi valem

Aerosooliosakeste spektraalse optilise paksuse esimesi uurijaid oli Rootsi füüsik ja meteoroloog Anders Knutsson Ångström (1888–1981), kes tegeles ka Päikese aktiivsuse ja solaarkonstandiga. Ta koostas eksponentsiaalse valemi vastava lainepikkuse aerosooliosakeste optilise paksuse $\delta_{\lambda, \text{aer}}$ jaoks (Ångström, 1929):

$$\delta_{\lambda, \text{aer}} = \beta \lambda^{-\alpha}, \quad (1.15)$$

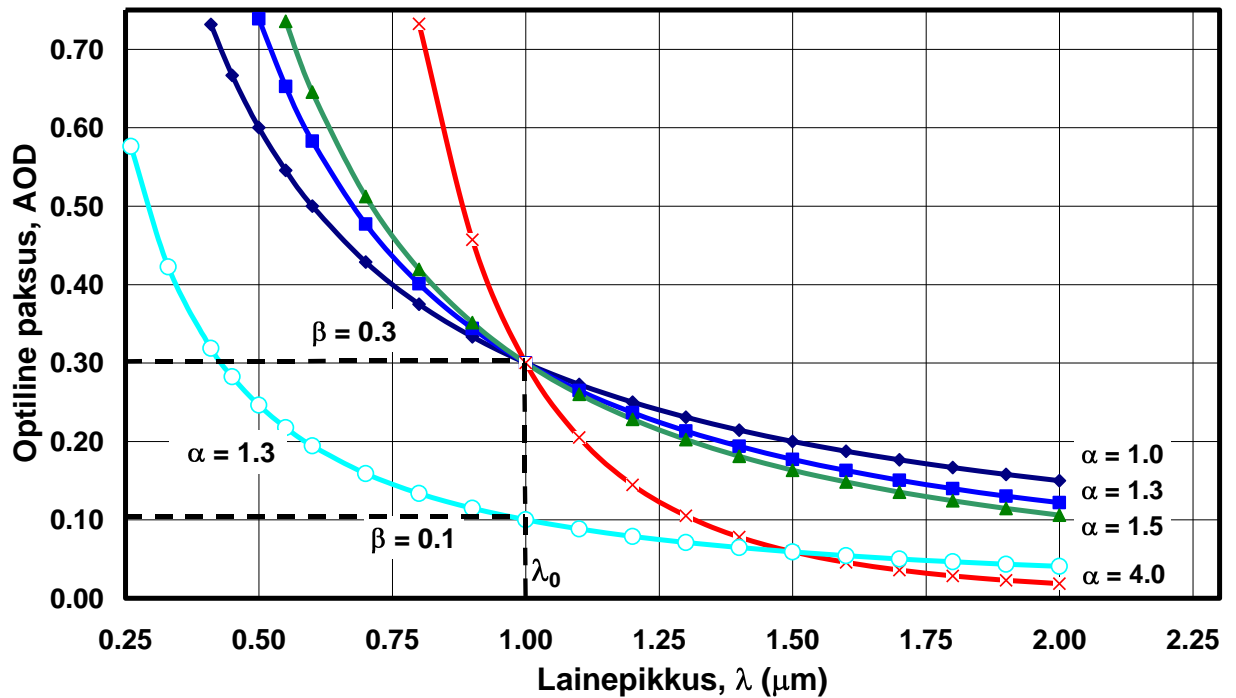
kus β on nn Ångströmi *sumedustegur* ja α Ångströmi *lainepikkuse eksponent*, λ ühikuks on mikromeeter. Aerosooliosakeste spektraalse optilise paksuse $\delta_{\lambda, \text{aer}}$ jaoks kasutatakse ka tähist **AOD** (Aerosol Optical Depth). Kuna λ on pikkuse dimensiooniga, siis valem (1.14) ei ole erinevate α väärtuste korral füüsikaliselt hästi interpreteeritav. Dimensioonidest lähtudes on korrektsem sama valem järgmisel kujul (Šifrin, 1995):

$$\text{AOD} = \beta \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-\alpha}, \quad (1.16)$$

kus Ångströmi järgi $\lambda_0 = 1 \mu\text{m}$. Lainepikkuse eksponendi keskmiseks väärtuseks sai Ångström $\alpha = 1.3$, muutumise tavapiirideks $1.0 < \alpha < 1.5$. Lainepikkuse eksponendi maksimaalne väärtus on $\alpha = 4$, mis vastab Rayleigh ehk molekulaarsele hajumisele.

Joonisele 1 on kantud Ångströmi valemi järgi leitud spektraalne optiline paksus erinevate lainepikkuse eksponentide α korral, aerosooliosakeste kihi tavapiiride äärmusväärtused, keskmine väärtus ja Rayleigh hajumise koefitsient sumedusteguri $\beta = 0.3$ korral. Lisatud on aerosooliosakeste spektraalse optilise paksuse jaoks üks joon, kus sumedustegur $\beta = 0.1$ ja lainepikkuse eksponent $\alpha = 1.3$. Näeme, et suurema lainepikkuse eksponendi α korral on optilise paksuse muutumine järsem. Seega atmosfääri väiksemate aerosooliosakeste korral (suits), sõltub optiline paksus lainepikkusest rohkem kui suuremate aerosooliosakeste korral (tolm). Võrreldes kolme erineva lainepikkuse eksponendi $\alpha = 1.0, 1.3, 1.5$ korral aerosooliosakeste optilise paksuse käiku, paneme tähele, et erinevus üksteisest ei ole suur, eriti baaslainepikkuse λ_0 ümbruses.

Spektraalne optiline paksus



Joon. 1. Spektraalne optiline paksus erinevate lainepikkuse eksponentide korral. On kasutatud kahte Ångströmi sumedusteguri β väärtust:

- 1) $\beta = 0.3$, mille korral $\alpha = 1.0, 1.3, 1.5, 4.0$,
- 2) $\beta = 0.1$, $\alpha = 1.3$

Rõhutame veelkord, et Ångströmi lainepikkuse eksponent on seotud osakeste mõõtmetega. See-
ga, mida pisemad on osakesed, seda suurem on tegur α . Minimaalsed võimalikud osakesed on
molekulaarsel hajumisel, sel juhul nagu eespool märgitud, $\alpha = 4$.

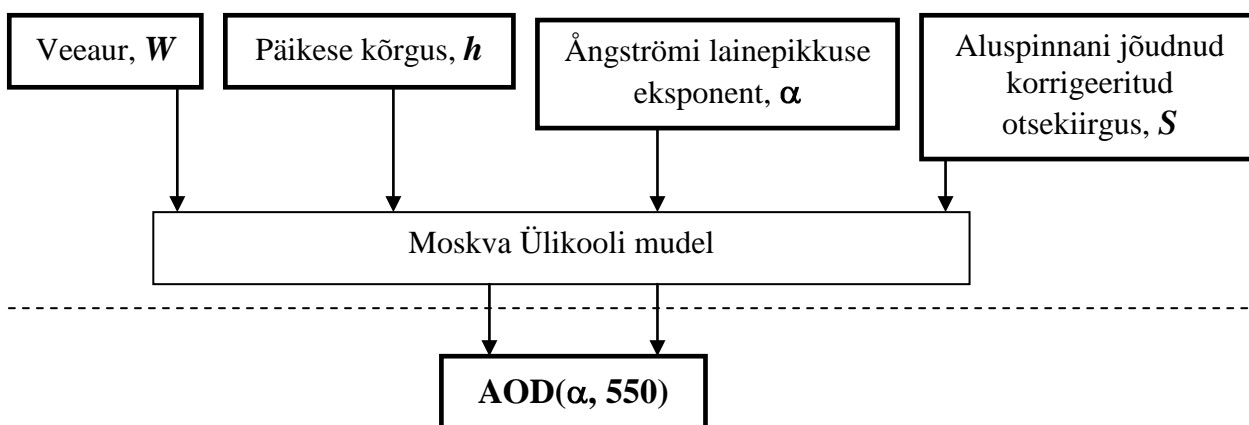
2. AEROSOOOLI OPTILISE PAKSUSE VALEMI TULETAMINE

2. 1. Moskva Ülikooli mudel

Moskva Ülikooli Meteoroloogia Observatooriumi teadurite Tarassova ja Jarho poolt koostatud mudel (Tarasova and Yarkho, 1991) võimaldab leida $AOD(\alpha, 550)$ kasutades 13 valemit ning andes ette neli sisendmuutujat:

- 1) aluspinnani jõudnud Päikese otsekiirgus, korrigeeritud Maa–Päike keskmisele kaugusele, S ,
- 2) Päikese kõrgus, h ,
- 3) veearusisaldus vertikaalses atmosfäärisambas, *precipitable water*, W ,
- 4) Ångströmi lainepikkuse eksponent, α .

Joonisel 2 on näidatud Moskva Ülikooli mudeli põhimõtteline skeem. Mudelisse antakse ette neli sisendparameetrit ning mudeli väljundiks on aerosooliosakeste kihi optiline paksus $AOD(\alpha, 550)$, st AOD lainepikkusel $\lambda = 550 \text{ nm}$ ehk inimese silma tundlikkuse ja Päikese spektri maksimumkohal.



Joon. 2. Plokkskeem Moskva Ülikooli mudelist. Neli sisendsuurust ja üks väljundsuurus: aerosooli optiline paksus lainepikkusel 550 nm.

Põhivalem, mille järgi arvutatakse aerosooliosakeste optilist paksust lainepikkusel **550 nm** on järgmine:

$$AOD(\alpha, 550) = \frac{\ln S - \left[AA + \frac{BA}{\sinh h} \right]}{AB - \frac{BB}{\sinh h}}. \quad (2.1)$$

AA , BA , AB ja BB on abifunktsioonid, mis sõltuvad α -st ja W -st. Nende arvutusvalemid on toodud välja käesoleva töö lõpus (Lisa 1).

Moskva mudeli väljund on häälestatud lainepikkusele **550 nm**, Ångström kasutas lainepikkust $\lambda_0 = 1 \mu\text{m}$, AERONET fotomeetrites on Päikese spektri maksimumile lähim väärtus **500 nm**.

Moskva Ülikooli mudeli üheks kasulikuks omaduseks on Ångströmi lainepikkuse eksponendi muudetavus. Võrreldes seda Qiu (2001) ja Gueymard (1998) mudelitega, siis viimastel see muudetavus puudub, lainepikkuse eksponent omab neis mudeleis baasväärtust $\alpha = 1.3$. Moskva Ülikooli mudelis on lainepikkuse eksponendi muutumispiirid $0.0 < \alpha < 2.0$.

Eeldades Ångströmi valemi (1.16) kehtivust

$$\text{AOD}(\lambda) = \beta(\lambda_0) \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-\alpha}$$

ja rakendades seda kahe lainepikkuse $\lambda = \lambda_1$ ja $\lambda = \lambda_2$ jaoks, saame ühe võrrandi teisega jagamisel avaldada $\text{AOD}(\lambda_2)$, kui on teada, lainepikkusel λ_1 mõõdetud AOD :

$$\text{AOD}(\lambda_2) = \text{AOD}(\lambda_1) \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{-\alpha}. \quad (2.2)$$

Seega saame lihtsasti teisendada Moskva Ülikooli väljundsuuruse $\text{AOD}(\alpha, 550)$ uueks aerosooli optiliseks paksuseks $\text{AOD}(\alpha, 500)$

$$\text{AOD}(\alpha, 500) = \text{AOD}(\alpha, 550) \left(\frac{500}{550} \right)^{-\alpha} = 1.1^\alpha \text{AOD}(\alpha, 550). \quad (2.3)$$

Analoogselt saame leida lihtsa seose tavapärase Ångströmi sumedusteguri $\beta = \text{AOD}(\alpha, 1000)$ ning $\text{AOD}(\alpha, 500)$ vahel:

$$\frac{\text{AOD}(\alpha, 500)}{\text{AOD}(\alpha, 1000)} = \left(\frac{500}{1000} \right)^{-\alpha},$$

$$\text{AOD}(\alpha, 500) = \beta \left(\frac{1000}{500} \right)^{-\alpha} = 2^\alpha \beta. \quad (2.4)$$

2. 2. Moskva Ülikooli mudeli teisendamine

2. 2. 1. Parametriseerimine sisendsuuruste α , p_2 ja W korral

Moskva ülikooli mudeli teisendamisel oli kaks eesmärki:

- asendada otsekiirguse S väärtus integraalse läbipaistvuskoeffitsiendiga p_2 , sellise asendusega vabaneme ühest sisenduurusest, Päikese kõrgusest h (kuigi p_2 arvutatakse kasutades h -d);
- esitada abifunktsioonid AA , AB , BA , BB ühes kompaktses valemis.

Olgu siinkohal märgitud, et edaspidi kasutatame konkretiseerimata α puhul lihtsuse huvides vahest AOD tähistamise jaoks $AOD\lambda$, ehk tegeledes lainepikkusega **500 nm**, asendame vajadusel $AOD(\alpha, 500)$ lühema tähistusega, **AOD500**.

Fikseerides Moskva mudeli valemis (2.1) Ångströmi α , saame arvutada abifunktsioonid AA , AB , BA , BB , mis sõltuvad vaid atmosfäärisamba veeaurusisaldusest W ja konkretiseerida **AOD500** valemi. Näiteks $\alpha = 1.3$ korral:

$$AOD(1.3, 550) = \frac{\ln S - \left(0.1881W^{-0.1860} - 2(0.8766W^{-0.0095} + 1) \right)}{0.7695W^{-0.0042} - 1 + 2(0.4999W^{-0.0287} - 1)}. \quad (2.5)$$

Tabeli Moskva mudeli abifunktsioonide väärtustest lainepikkuse eksponendi vahemikus $1.0 < \alpha < 2.0$ leiab käesoleva töö lisast 1.

Teisendamise esimeseks sammuks oli otsekiirguse esitamine atmosfääri integraalse läbipaistvuskoeffitsiendi p_2 ja solaarkonstandi S_0 kaudu. Tähistades maapinnale jõudnud Päikesekiirguse S ja atmosfääri ülapiirile jõudva otsekiirguse ehk solaarkonstandi S_0 ning integraalse atmosfääri läbipaistvuskoeffitsiendi massiarvul $m = 2$ ($h = 30^\circ$) p_2 -ga saame seose (Ohvriil *et al.* 1999):

$$S = S_0 (p_2)^2$$

ehk

$$\ln S = \ln S_0 + 2 \ln p_2 = 2 \ln p_2 + 0.3126. \quad (2.6)$$

Asendades seose (2.6) valemisse (2.5) saame

$$AOD(1.3, 550) = \frac{2 \ln p_2 + 0.3126 - 0.1881W^{-0.1860} - 1.7532W^{-0.0095} + 2}{0.7695W^{-0.0042} - 0.9998W^{-0.0287} - 3}. \quad (2.7)$$

Vaatleme saadud seost (2.7) kaheosalise funktsioonina:

$$AOD = a \ln p_2 + b,$$

kus a ja b on funktsioonid, mis sõltuvad vaid atmosfäärisamba veeaurusisaldusest, W :

$$\begin{aligned} \text{AOD}(1.3, 550) &= \tag{2.8} \\ &= \frac{2}{0.7695W^{-0.0042} - 0.9998W^{-0.0287} - 3} \ln p_2 + \frac{-0.1881W^{-0.1860} - 1.7532W^{-0.0095} + 2.3126}{0.7695W^{-0.0042} - 0.9998W^{-0.0287} - 3} \end{aligned}$$

Modelleerides seost (2.8) sadestatava veeauru väärtustel $1 \text{ mm} < W < 60 \text{ mm}$ vähimruutude meetodil, lähendades funktsioone a ja b sirgetega, ja sidudes need funktsioonid lainepikkuse eksponentidega vahemikus $1.0 < \alpha < 2.0$ ning lõpuks minnes üle lainepikkusele 500 nm , saame kokku üheainsa valemi

$$\begin{aligned} \text{AOD}(\alpha, 500) &= (1.1^\alpha) \left(\frac{1}{3} (0.7578\alpha - 0.6575) W^{(-0.0173\alpha - 0.0039)} \ln(p_2) + \right. \\ &\quad \left. + (-0.1488\alpha - 0.0974) W^{(-0.0243\alpha + 0.1646)} \right) \end{aligned} \tag{2.9}$$

Võrrand (2.9) on üldvalem aerosooliosakeste optilise paksuse leidmiseks lainepikkusel $\lambda = 500 \text{ nm}$.

Vaadeldes saadud parametriseringu (2.9) tulemust, uurime, kui palju muudab lõpptulemust valemis esinevate kordajate ümardamine kolme kümnendkohani. Teostame kontrollarvutused keskmise atmosfääri seisundi jaoks, kus mudeli sisendparameetriteks osutuvad järgmised väärtused:

- Ångströmi lainepikkuse eksponent $\alpha = 1.45$,
- atmosfääri veeauru hulk, $W = 1.3 \text{ cm}$,
- integraalne läbipaistvuskoeffitsient, $p_2 = 0.75$.

Olgu märgitud, et antud väärtused on ligilähedased Tartu Observatooriumis mõõdetud 5 aasta (2002–2006) keskmistele.

Esialgne valem (2.9), kaotades ära lihtsuse huvides neljanda kümnendkoha koeffitsientidest, saab järgneva kuju:

$$\begin{aligned} \text{AOD}(\alpha, 500) &= \tag{2.10} \\ &= (1.1^\alpha) \left(\frac{1}{3} (0.758\alpha - 0.658) W^{(-0.017\alpha - 0.004)} \ln(p_2) + (-0.149\alpha - 0.097) W^{(-0.024\alpha + 0.165)} \right) \end{aligned}$$

Leiame ülaltoodud andmetega AOD_{500} väärtuse nii valemi (2.9) kui ka uue valemi (2.10) järgi. Valem (2.9) annab meile tulemuseks $\text{AOD}_{500} = 0.2037$, valem (2.10) aga $\text{AOD}_{500} = 0.2041$. Suhteline viga kahe tulemuse vahel tuleb

$$\frac{|\text{AOD}_{500,2.9} - \text{AOD}_{500,2.10}|}{\text{AOD}_{500,2.9}} = 0.0017 \approx 0.2\% .$$

Töö autor leiab, et **AOD** muutlikkust ja mõõtmistäpsust arvestades võib edasipidi kasutada **AOD500** leidmisel valemit (2.10), mida hakkame ka lähemalt uurima.

Konkretiseerides Ångströmi eksponendi väärtust, näiteks $\alpha = 1.3$, saame valemist (2.10) oluliselt lihtsama järgneva seose:

$$\mathbf{AOD(1.3, 500) = -1.86W^{-0.026} \ln(p_2) - 0.329W^{0.133}}. \quad (2.11)$$

Seos (2.10) ja selle konkretiseeritud juht (2.11) on oluliselt lihtsamad, kui Moksva Ülikooli originaalmudel ning sobivad olukorras, kus Päikese otsekiirguse spektraalandmeid pole, kuid on teada atmosfääri integraalne läbipaistvus p_2 . Koefitsiendi p_2 mitmekümneaastased aegread on olemas Tõravere, Tiirikoja, Moskva, Feodossia ning paljude teiste endiste NSVL aktinomeetria-jaamade jaoks.

2. 2. 2. Parametriseerimine sisendsuuruste α , BAOD ja W kaudu

Vaatleme nüüd alternatiivset võimalust tuletada Moskva Ülikooli mudelist ühevalemiline seos, kuid seda teiste sisendsuuruste α , W , BAOD korral, kus BAOD (Broadband Aerosol Optical Depth) on integraalne (laiaribaline) aerosooliosakeste optiline paksus.

Kasutame peatükis 1 kirjeldatud atmosfääri jagamist kolmeks erinevaks kihiks:

- ideaalne ehk puhas ja kuiv atmosfäär (Clean and Dry Atmosphere), integraalne optiline läbitavus τ_{CDA} ,
- veeaur, integraalne optiline läbitavus τ_w ,
- aerosooliosakeste kiht, summaarne integraalne optiline läbitavus τ_{aer} .

Nagu eespool mainitud, on atmosfääri integraalset optilist läbitavust käsitletud ka multipli-katiivse suurusena (Gueymard, 1998), seega kogu atmosfääri optiline läbitavus:

$$\tau = \tau_{CDA} \tau_w \tau_{aer}.$$

Konkretiseerime olukorra sellise tingimuseni, kus vaatleja “näeb” Päikest kõrgusel $h = 30^\circ$ ehk optiline massiarv $m = 2$. Sel juhul aluspinnani jõudnud otsekiirgus:

$$S = \tau_2 S_0 = \tau_{CDA,2} \tau_{w,2} \tau_{aer,2} S_0.$$

kus vastavasuunalised optilised läbitavused (Okulov, 2003):

$$\tau_{CDA,2} = 0.819; \quad \tau_{w,2} = 1 - 0.137W^{0.32}; \quad \tau_{aer,2} = \exp(-2BAOD_2).$$

Asetades suuruste h , m , S_0 , $\tau_{\text{CDA},2}$ väärtused Moskva mudeli üldvalemisse (2.1), kasutades $\tau_{\text{W},2}$ ning $\tau_{\text{aer},2}$ valemeid, jättes muutujateks ainult W ning BAOD_2 , saame valemi fikseeritud Ångströmi eksponendi $\alpha = 1.3$ jaoks seose:

$$\begin{aligned} \text{AOD}(1.3, 550) &= \tag{2.12} \\ &= \frac{-2\text{BAOD}_2 + \ln(1.1196 - 0.1534W^{0.32}) - 0.1881W^{-0.186} - 1.7532W^{-0.0095} + 2}{0.7695W^{-0.0042} + 0.9998W^{-0.0287} - 3}. \end{aligned}$$

Sarnaselt peatükis 2.2.1 kirjeldatule, on ka siin vastavate abifunktsioonide väärtused eelnevalt leitud tabelist (Lisa 1) ning edasisel lihtsustamisel on kasutatud sarnaseid meetodeid ja naturaallogaritmi omadusi.

Vaatleme seost (2.12) jällegi kaheosalise funktsioonina:

$$\text{AOD} = c \text{BAOD} + d,$$

kus c ja d on funktsioonid, mis sõltuvad vaid atmosfäärisamba veeaurisisaldusest W .

Lähendame erinevate lainepikkuse eksponentide koefitsiendid (liige c) astmefunktsioonikujule sõltuvana W -st. Liige d muutub vahemikus $-0.04 < d < 0.03$, seega võtame d võrdseks nulliga.

Füüsikaliselt põhjendub see järgnevalt: aerosoolivabas atmosfääris (integraalne optiline paksus, $\text{BAOD} = 0$) ei saa ka mõni spektraalne optiline paksus $\text{AOD}\lambda$ erineda nullist.

Lähendades vähimruutude meetodil ülalosaadud funktsioonide kordajaid ja astendajaid, sidudes neid Ångströmi α väärtustega saame järgmise tulemuse:

$$\text{AOD}(\alpha, 550) = 0.943 e^{0.423\alpha} W^{-0.02\alpha} \text{BAOD}_2.$$

Sarnaselt eelmise skeemi kohaselt, läheme üle Ångströmi valemi (2.2) kohaselt üle lainepikkusele $\lambda = 500 \text{ nm}$. Saame järgneva valemi:

$$\text{AOD}(\alpha, 500) = 1.1^\alpha 0.943 e^{0.423\alpha} W^{-0.02\alpha} \text{BAOD}_2. \tag{2.13}$$

Tähistame lainepikkuse eksponendist ja veeaurisisaldusest sõltuva liikme valemis (2.13):

$$\mathbf{A_B} = 1.1^\alpha 0.943 e^{0.423\alpha} W^{-0.02\alpha}.$$

Valem (2.13) on teine versioon Moskva mudelist erinevate sisendsuurustega. Valem (2.13) võimaldab meil kergesti leida seose laiaribalise aerosooliosakeste optilise paksuse ning spektraalse optilise paksuse vahel. Veelgi üldisemalt, kasutades seoseid (2.2) ning (2.13) on võimalik arvutada mistahes spektraalse optilise paksuse suhe integraalse aerosooliosakeste optilise paksuse kohta, mida väljendab lühidalt liige $\mathbf{A_B}$.

Käesolev alapeatükk on sissejuhatuseks $\text{AOD}\lambda$ alternatiivmudeli koostamisele, mida siin magistritöös ei käsitleta.

2. 3. AOD arvutusmudeli arendamine

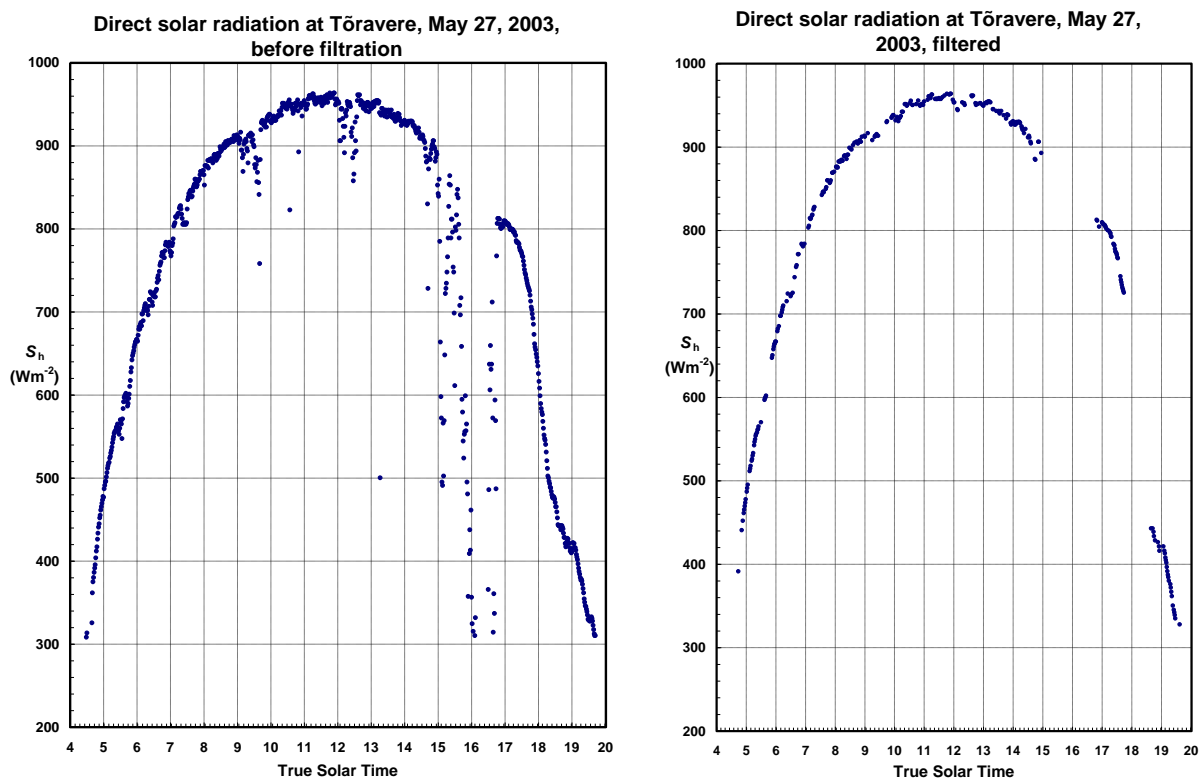
2. 3. 1. Võrdlusmeetodid

Arvutusvalemid (2.10) on käesolevas töös arendatud, kasutades võrdluseks kolmel erineval meetodil arvatud **AOD500** väärtust:

- Tartu Observatooriumis mõõdetavat **AOD500**,
- Moskva Ülikooli mudeli järgi leitud **AOD500**,
- Chr. Gueymardi mudeli järgi leitud **AOD500**.

Tartu Observatooriumis töötab aastast 2002 USA Aeronautika ja Kosmose Administratsiooni (NASA) poolt paigaldatud Päikese fotomeeter Cimel CE 318-1, mis mõõdab aerosooli optilist paksust lainepikkustel: **340, 380, 440, 500, 670, 870, 1020 nm**. Seade kuulub võrgustikku AERONET, mis tuleneb sõnadest AErosol RObotic NETwork. Antud töös on kasutatud võrdluseks just selle fotomeetri abil leitud **AOD500** väärtusi kvaliteeditasemelt Level 2, Version 2. Viiel aastal (2002–2006) on kogunenud üle 10 000 mõõteseria.

Et saaksime parametrizeeritud mudelit paremini hinnata, peaksid mudeli poolt arvatud ja AERONET poolt mõõdetud andmed kehtima sama ajamomendi kohta. Mudel vajab p_2 väärtusi, mis leitakse Tartu Observatooriumis mõõdetud otsekiirguse kaudu. Viimast teostab Päikese aktinomeeter AT-50. Nii aktinomeetri kui AERONET fotomeetri enda poolt mõõdetud andmed on O. Okulovi poolt ühendatud andmebaasi, kus kahe erineva seadme poolt mõõdetud ajavahe ei ületa kümnet minutit. Enne andmebaaside ühendamist on tehtud ka filtreerimine, kus liiga väikesed S_m ja p_2 väärtused ja nende kiired ajalised muutused on likvideeritud. Pärast seda on läbi viidud S_m graafiku visuaalne vaatlus (Okulov, 2006). Joonisel 3 on näha algsed Päikese kiirguse väärtused tõelise päikeseaja järgi ning võrdluseks filtreeritud kõver. Joonis on koostatud 27. mai 2003 andmete põhjal.



Joon. 3. Liiga väikeste ja kiirelt muutuvate S_m väärtuste filtreerimine 27. mail 2003. (Saadud O. Okulovilt).

Sel teel liidetud ja filtreeritud ühendatud andmebaas koosneb 10 550 mõõtmispunkti aastatel 2002–2006.

Teiseks võrdluseks oli käesoleva mudeli alg-versioon, Moskva Ülikooli oma, millele antakse ette aktinomeetri mõõdetud ja korrigeeritud S_m väärtused, Päikese kõrgus h , veeaurisisaldus W ning Ångströmi α , nagu peatükis 2.1 kirjeldatud. Kõigi mudelite jaoks arvutatakse atmosfääri veeaurisisaldus lähtudes maapinnalähedasest veeauru rõhust Tõraveres valemi

$$W(\text{cm}) = 0.148 e_0 + 0.04 \quad (2.14)$$

järgi (Okulov, 2003).

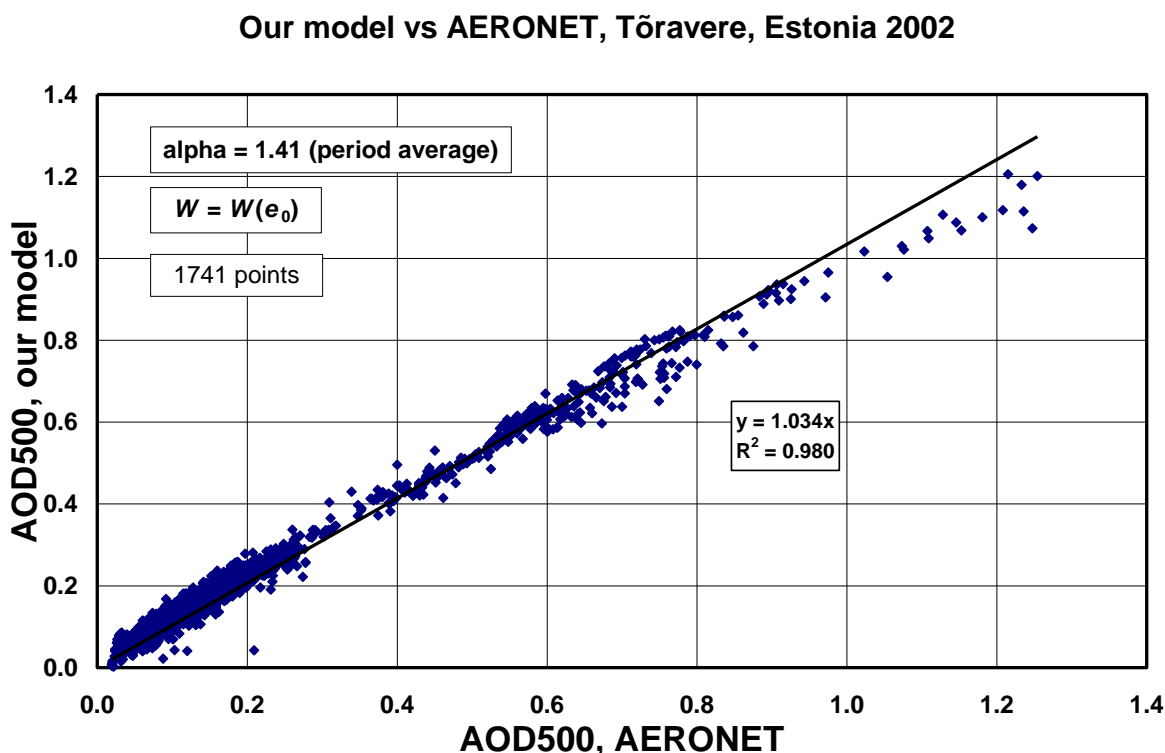
Kolmandaks võrdlusmudeliks on Ameerika-Prantsuse atmosfäärioptiku Christian Gueymardi väga keerukas mudel, mis nõuab **AOD500** arvutamiseks üle mitmekümne sisendvalemi (Gueymard, 1998).

2. 3. 2. Hajuskiirguse arvestamine

Meie mudeli, mis on kirjeldatud valemiga (2.10), esimesel kontrollil selgus, et suurtel **AOD500** väärtustel alahindab mudel pisut reaalseid mõõtmisi. Vaatleme näiteks aastat 2002, kus pikaaja-

lise põua tõttu osutus aerosooliosakeste kihi optiline paksus atmosfääris tavapärasest kõrgemaks ning ulatusid kuni väärtuseni $\text{AOD}_{500} = 1.3$.

Jooniselt 4 näeme, et kõrgetel AOD_{500} väärtustel annab valem (2.10) väiksemaid väärtusi, kui AERONET fotomeeter. Põhjuseks võib olla otsekiirguse mõõtja, aktinomeetri suur avanurk. Kuna Päike hõlmab ruuminurka $32'$, kuid aktinomeetri ava on 10° , siis sumedatel päevadel, kus atmosfääri aerosooliosakeste sisaldus on suur, on Päikese ümber hajuskiirgus, mida aktinomeeter “tõlgendab” kui otsekiirgust. Selle läbi otsekiirgus oleks justkui mõõdetud suuremana,

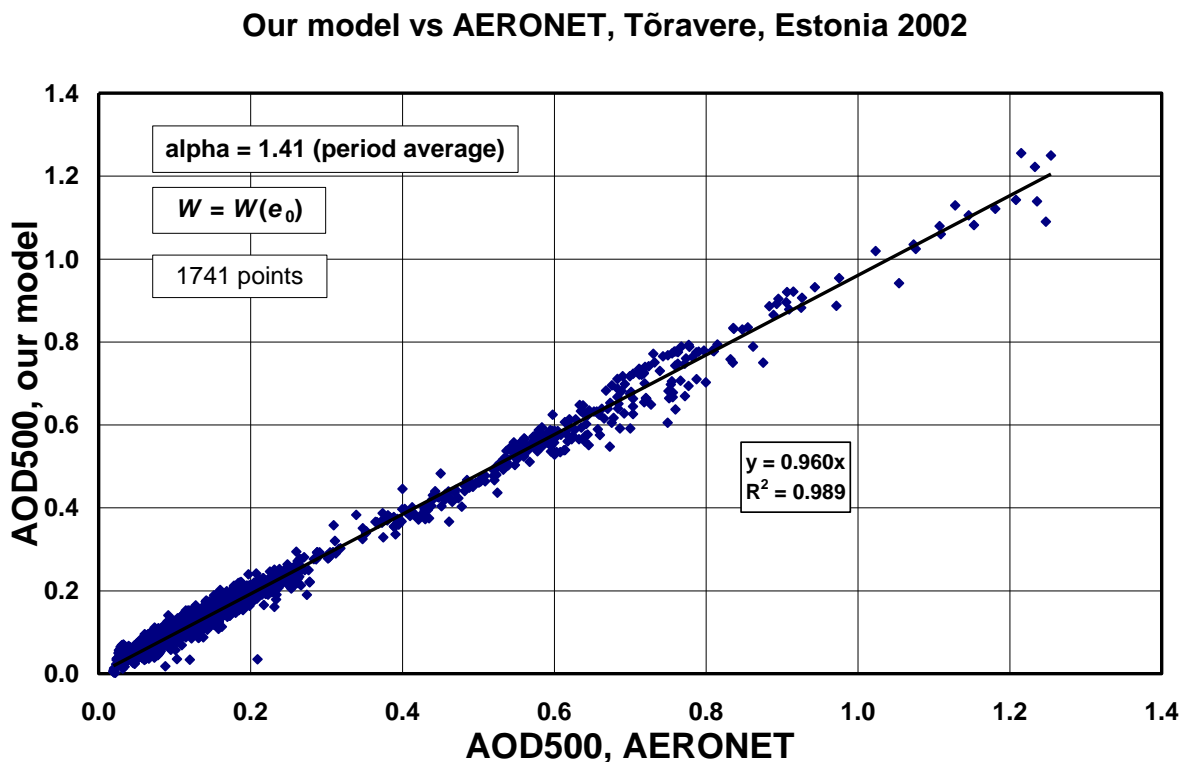


Joon. 4. Valemi (2.10) järgi arvutatud AOD_{500} võrreldes AERONET mõõtmistega aastal 2002, Tõraveres.

alahinnates sealjuures aerosooliosakeste olemasolu. Selle teguri arvestamiseks sobitasime mudelisse täiendava konstandi $p_2^{-0.4}$, mis vähendab sumedamates olukordades läbipaistvust, samas võimendab AOD_{500} väärtust ka selgemate ilmade korral. Selle võimenduse likvideerimiseks lisasime lineaarse konstandi 0.75 , mis toob AOD_{500} väärtused normaaltasemele ning üldine tendents ülehinnata on sellega kõrvaldatud. Arvestades neid tingimusi, tekib valemist (2.10) järgmine võrrand

$$\text{AOD}(\alpha, 500) = 0.75(1.1^\alpha) p_2^{-0.4} \cdot \left(0.758\alpha - 0.658 \right) W^{(-0.017\alpha - 0.004)} \ln(p_2) + (-0.149\alpha - 0.097) W^{(-0.024\alpha + 0.165)} \quad (2.15)$$

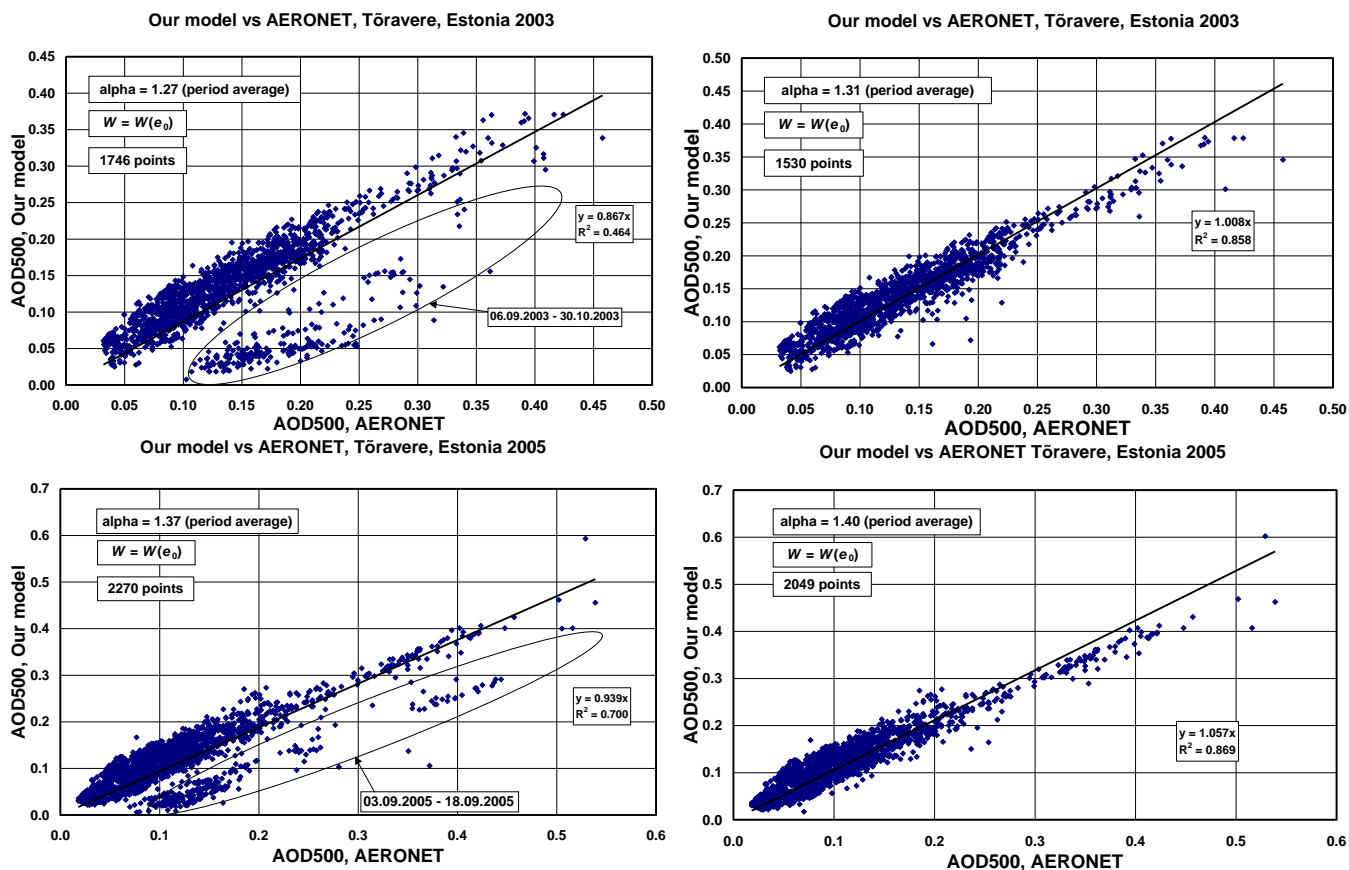
Kasutades saadud valemit (2.15) AERONET Tõraveres 2002. aastal toimunud 1741 mõõtmistulemuse modelleerimiseks, saame ideaalilähedase tulemuse (joonis 5).



Joon. 5. Valemi (2.15) järgi arvutatud AOD500 võrreldes AERONET mõõtmistega aastal 2002, Tõraveres. Päikeseümbruse hajuskiirguse mõju on arvesse võetud.

2. 3. 3. Probleemsed aastad 2003 ja 2005

AERONET järgmiste aastate mõõtmiste modelleerimisel selgub, et kahel aastal on toimunud oluline ebakõla võrreldes teiste mudelitega. Esimest korda oli see märgatav aastal **2003** perioodil **6. september – 30 oktoober**, kus mõõdetud oli kokku kahekümne ühel päeval ning kahtlaste üksikmõõtmiste arv küündis 216ni. Teisel korral aastal **2005** samuti sügisel, perioodil **3 september – 18 september**, kus toimus 10 mõõtmispäeva, mis kokku andsid 221 punkti. Neil perioodidel on mudelite järgi arvutatud **AOD500** väärtused oluliselt väiksemad AERONET omadest. Joonisel 6 on toodud nende kahe aasta võrdlustulemused, kusjuures vasakpoolsetel graafikutel on kahtlased mõõtmispunktid sees, parempoolsetel on need eemaldatud. Võrreldud on omavahel AERONET mõõtmistulemusi parametrizeeritud mudeliga, mida kirjeldab valem (2.15).



Joon. 6. Mudeli (valem 2.15) ja AERONET mõõtmiste võrdlus aastatel 2003 ja 2005. Parempoolsetel graafikutel on eemaldatud kahtlased mõõtmised.

Võrdlusest selgub, et nimetatud perioodidel, mis hõlmasid kahe aasta peale kokku $216 + 221 = 437$ vaatlustulemust $21 + 10 = 31$ päeval, mudel alahindab reaalseid mõõtmistulemusi. See võib tingitud olla AERONET mõõteriista sattunud putukast või mõnest muust kiirgust nõrgendavast põhjusest. Jätsime nimetatud kaks kahtlust tekitavat perioodi edasisest analüüsist välja.

3. MUDELI KONTROLL JA ANALÜÜS

3. 1. Võrdlus Moskva Ülikooli originaalmudeliga

Mudeli (2.15) kontrolliks on läbi viidud põhjalik analüüs, võrreldes omavahel käesoleva töö atmosfäärioptilist mudelit teiste (Moskva Ülikooli ja Chr. Gueymardi) omadega. Põhikontrolliks on võrdlus AERONET **AOD500** mõõtetulemustega. Järgnevalt vaatleme, kui palju erineb meie mudel Moskva mudelist, millest on see tuletatud. Selleks on läbi tehtud lineaarse regressiooni analüüs, mis annab kvantitatiivsed tulemused hindamaks valemi (2.15) sobivust. Regressioonanalüüsi aluseks valisime tingimused, kus vaadeldud on mudelite korrelatsiooni AERONET mõõtmistega terve vaatlusperioodi (2002–2006) vältel, kus esines 10 113 mõõtmisseeriat.

Moskva Ülikooli mudeli ja meie valemi (2.15) analüüsil tekkinud regressioonparameetrid on koondatud tabelisse 1.

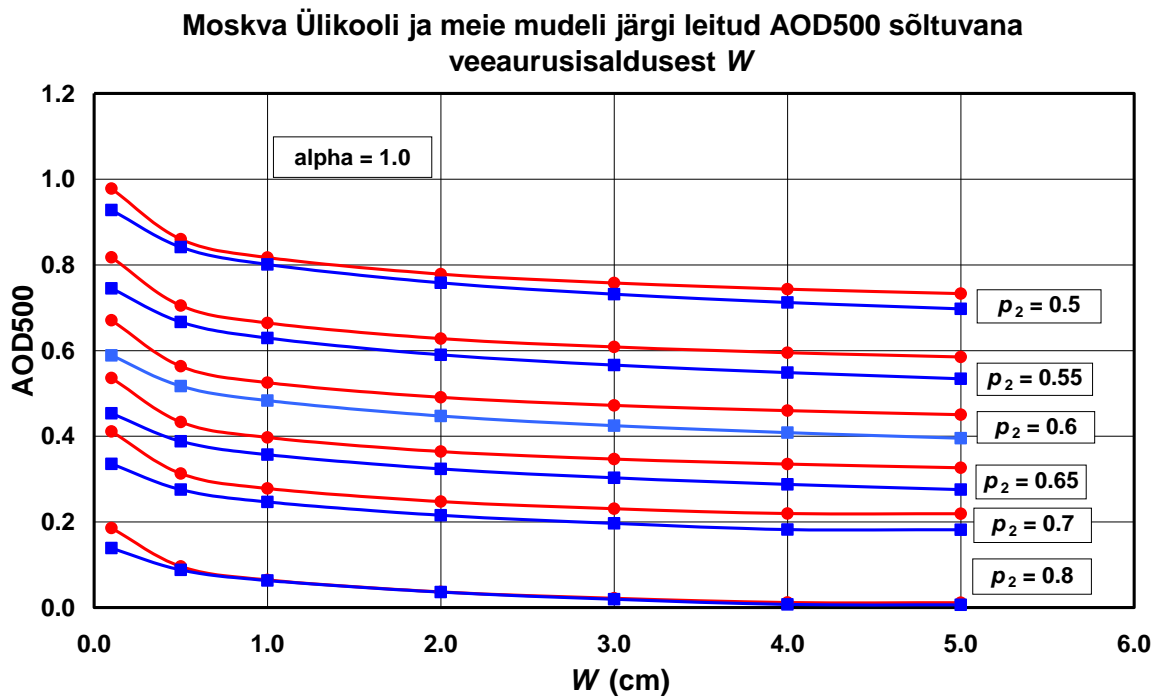
Tabel 1. Moskva Ülikooli mudeli ja meie valemi regressiooniparameetrid

	Tähis	Moskva mudel	meie valem
Determinatsiooni koefitsient	R^2	0.9588	0.9592
Korrelatsioonikonstant	R	0.9792	0.9794
Standardviga	Δ	0.0312	0.0302
Sirge tõus	a	1.0186	1.0051
Sirge tõusu viga	Δa	0.0014	0.0013

Vahetust võrdlusest näeme, et mudeli (2.15) hajuvus on väiksem, kui lähtemudeli (Moskva) oma, kindlustades sellega parema determinatsioonikoefitsiendi ning ühtlasi ka korrelatsioonikoefitsiendi. Meie mudeli standardviga tuli väiksem, samas ka regressioonisirge tõus tuli ühele lähemal ning tõusuviga väiksem kui Moskva Ülikooli mudelil. Seega mudel (2.15) töötab meie vaatlustingimuste kohta veidi paremini, kui Moskva Ülikooli oma. Tõsi, need kahe mudeli kvantitatiivsed regressioonparameetrid erinevad teineteisest marginaalselt.

Järgnevalt võrdleme nende kahe mudeli simulatsiooni tingimustes, kus Ångströmi eksponent $\alpha = 1.0$, p_2 muutub vahemikus $0.5 < p_2 < 0.8$ ning atmosfääri veeaurisisaldus $0.1 < W < 5.0$. Joonisel 7 on toodud nii meie kui ka Moskva Ülikooli mudeli **AOD500** sõltuvus veeaurisisaldusest sellistes tingimustes.

Atmosfääri integraalse läbipaistvuse p_2 väiksemate väärtuste korral on spektraalne aerosooli- osakeste optiline paksus suurem. Läbipaistvuse kasvades, **AOD** väheneb. Veeaurisisalduse vähenedes, atmosfääri aerosooliosakeste paksus suureneb, veeauririkka atmosfääri korral aerosooliosakeste optiline paksus kahaneb, kuid mitte nii järsult, kui seda toob endaga kaasa läbipaistvuse paranemine, (p_2 suurenemine).

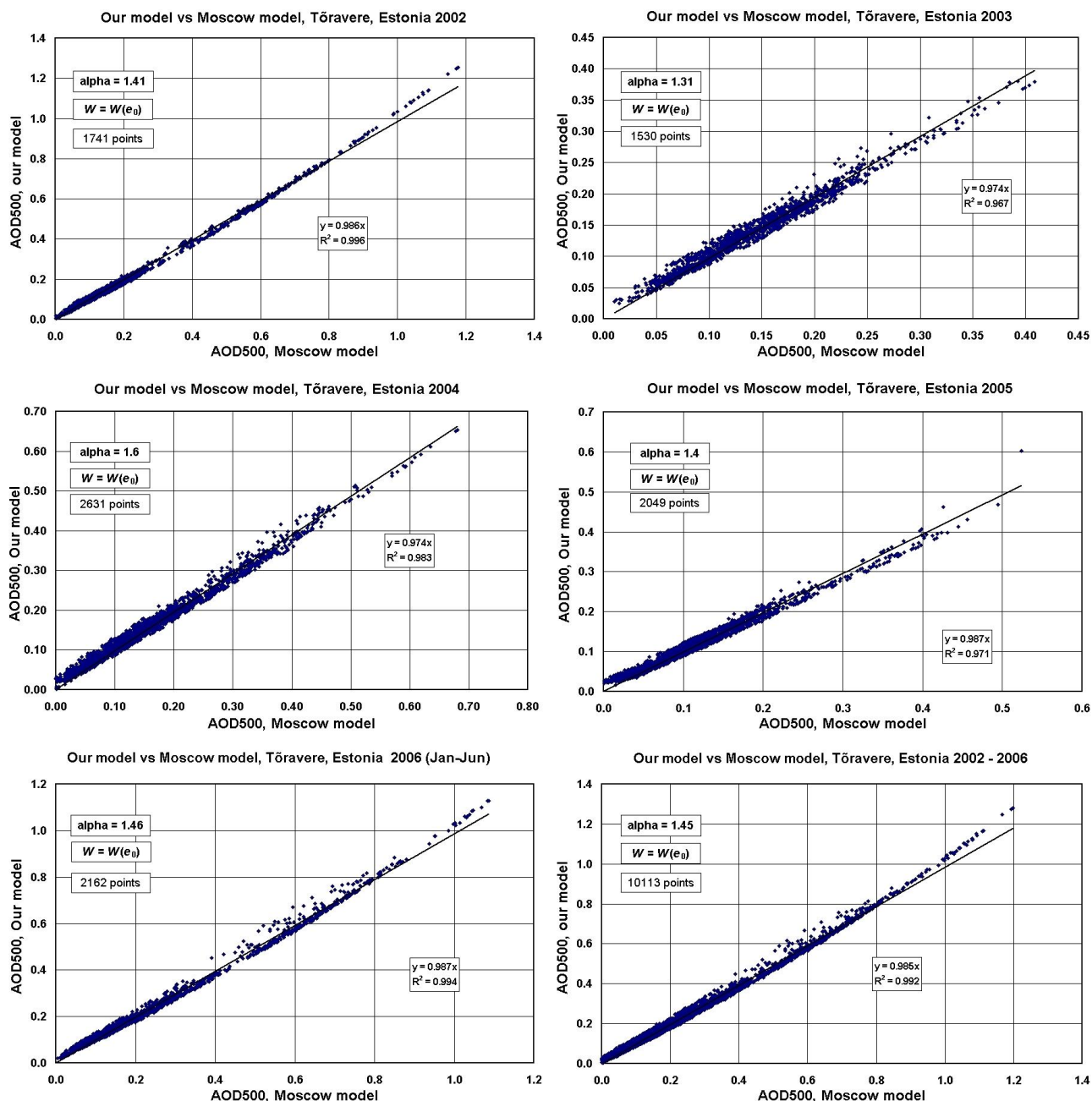


Joon. 7. Valemi (2.15) ja Moskva Ülikooli mudeli **AOD500** käik. Muutuvateks parameetriteks on W ja p_2 , Ångströmi eskponent on kogu joonisel konstantne, $\alpha = 1.0 = \text{const}$

Jooniselt 7 näeme veel, et Moskva Ülikooli mudel (punased jooned) annab regulaarselt kõrgemaid **AOD500** väärtuseid samade tingimuste korral kui meie mudel. Suurimad erinevused käivad väga kuiva (vähese veeaurisisaldusega, külm talveilm) ning väga niiske atmosfääri (soe suveilm) kohta, kus **AOD500** väärtus erineb mudeliti **0.05...0.08** võrra. Praktikas selliste olukordade teke on üliharv ning keskmistel tingimustel annab Moskva mudel vaid pisut suuremaid **AOD500** väärtusi.

Asjaolu, et lähtemudel (Moskva Ülikooli originaalmudel) annab veidi suuremaid tulemusi kui meie mudel, nõudis täiendavat uurimist. Selleks on läbi viidud kahe mudeli omavaheline võrdlus, kus sisendparameetriteks on reaalsed mõõtetulemused mõlema mudeli puhul ning regressioongraafiku x -teljele on kantud Moskva Ülikooli järgi leitud **AOD500** ning y -teljele meie mudeli järgi leitu.

Joonisel 8 on paigutatud 6 erinevat graafikut, millel on kahe mudeli omavaheline võrdlus iga aasta kohta eraldi ning kogu perioodi kohta summaarselt.



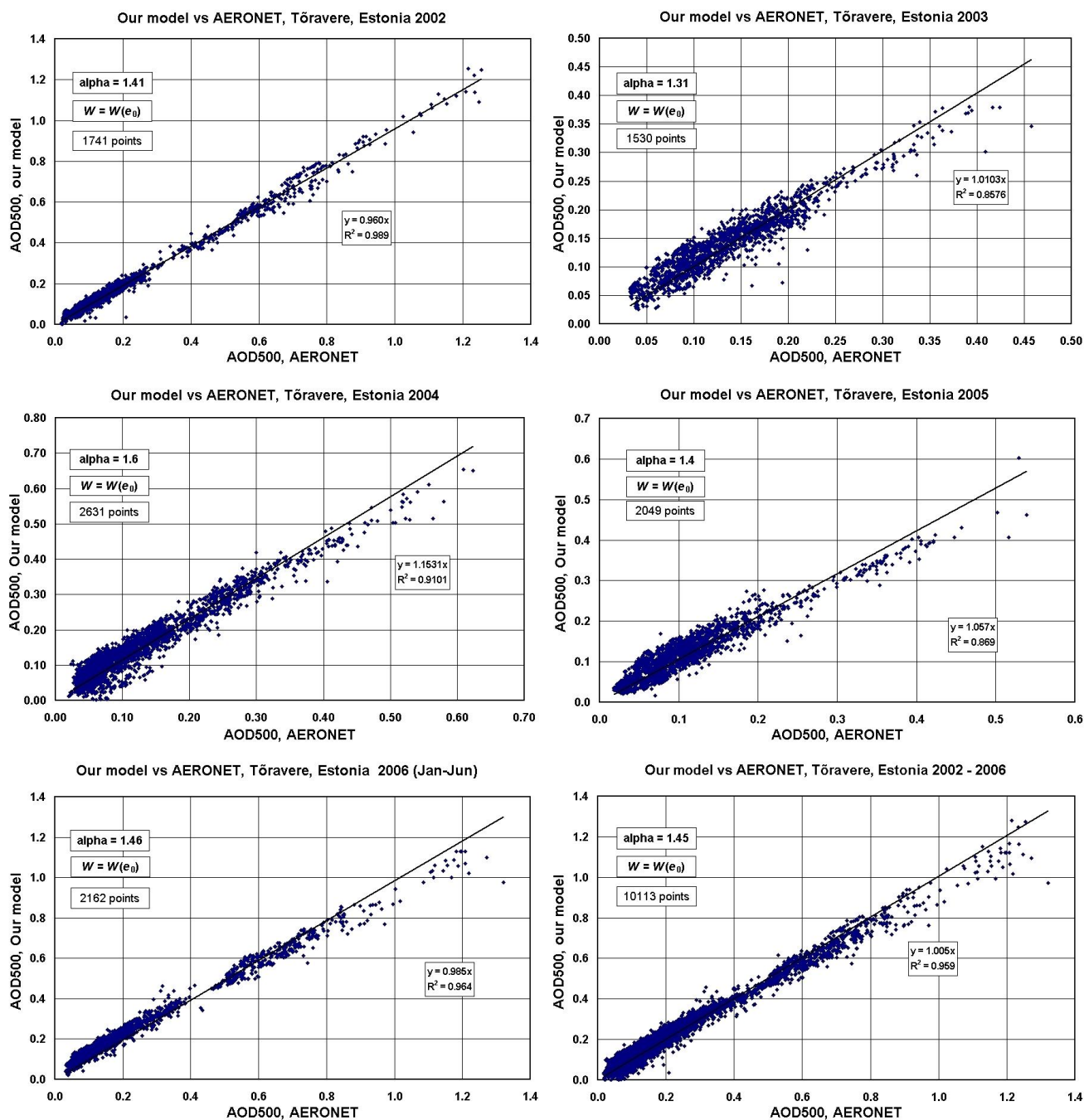
Joon. 8. Meie mudeli ja Moskva mudeli AOD500 omavaheline võrdlus aastate lõikes ning kogu perioodi (2002–2006) kohta kokku. Sisendparameetriteks on Tõraveres mõõdetud andmed. NB! Graafikute mastaabid on erinevad.

Kinnitust leiabki tõsiasi, et Moskva mudel annab üldiselt pidevalt suuremaid väärtuseid kui meie mudel (regressioonsirge tõus, $a < 1$) sealjuures on mudelid omavahel hästi korreleeruvad ($R^2 > 0.97$). Märkimist väärib erinev käitumine väga sumedate tingimuste korral, kui $AOD500 > 1.0$. Sellistel juhtudel annab meie mudel suurema sumeduse, kui Moskva Ülikooli oma. See erinevus

on tingitud mudeli korrigeerimisest (peatükk 2.3.2), kus eeldatavalt arvestame Päkese ümbruse (oreooli) hajuskiirgust, mis toob kaasa Moskva mudeli tõenäosel alahinnatud sumedad **AOD500** väärtused.

3.2. Võrdlus AERONET vaatlustega

Meie mudeli regressioonõrdlused AERONET mõõtmistega on läbi viidud iga aasta kohta eraldi kui ka kogu perioodi kohta summaarselt. Joonisel 9 on esitatud kuuegraafiline plokk, mille



Joon. 9. Meie mudeli ja AERONET mõõtmistulemuste võrdlusgraafikud iga aasta kohta eraldi ning summaarselt (2002–2006). NB! Graafikute mastaabid on erinevad.

pealt leiab meie mudeli arvatud ja AERONET fotomeetri mõõdetud tulemuste võrdluse iga aasta kohta eraldi (2002, 2003, 2004, 2005, 2006) ning viimasena kogu mõõtmisperioodi graafik, mis sisaldab kokku **10 113** vaatluspunkti. Olgu märgitud, et 2006 aasta jaoks olid andmed saadaval vaid esimese kuue kuu kohta (jaanuar–juuni).

Mudeli kontroll on koostatud kasutades sisendparameetritena antud vaatluse p_2 väärtust, veeaurisisalduse W väärtust, mis on leitud maapealse veeaururõhu e_0 kaudu valemi (2.14) järgi ning antud perioodi (aasta) aritmeetilist keskmist Ångströmi lainepikkuse eksponenti. Viimane suurus on leitud, kasutades AERONET fotomeetri α väärtusi lainepikkustel **440, 500, 670 ja 870 nm**. Üldise kokkulangevuse igal aastal võib tunnistada heaks. Seejuures aastad 2002, 2003 ja 2006 võib lugeda väga hästi kirjeldatuks valemi (2.15) poolt. Antud aastate lõikes mudel ei üle-ega alahinnanud reaalseid mõõtmisi keskmiselt rohkem kui **4%**. 2005ndal aastal võib täheldada keskmist ülehindamist üle **5%** ning erandlikul 2004ndal aastal keskmiselt koguni **15%**. Olgu siinkohal märgitud, et sarnase tendentsiga modelleerimistulemusi andsid ka teised võrdluskemid, kaasa arvatud lähtemudel Moskva Ülikooli oma. Kogu modelleeritava perioodi lõikes kirjeldab meie mudel keskmiselt reaalsust suurepäraselt ($y = 1.005 x$), kindlustades ka vaatlustulemustega kõrge korrelatsiooni ($R^2 = 0.959$).

Täiendavalt uurisime rohkem hajuvaid mõõtmispunkte. Selleks jagasime AERONET mõõdetud 10 113 **AOD500** väärtust **0.2** ühiku järgi gruppidesse nii, et esimeses grupis on mõõtmised: **0.0 < AOD500 < 0.2**, teises grupis **0.2 ≤ AOD500 < 0.4** jne. Viimase, kuuenda grupi, kus on oluliselt vähem andmeid, jätsime laiemaks: **1.0 ≤ AOD500 < 1.4**. Seejärel leidsime iga grupi kohta summaarse hälbe meie mudeli ja AERONET mõõdetud **AOD500** vahel. Gruppide hälbed (ruutkeskmised erinevused) leidsime järgneva valemi järgi:

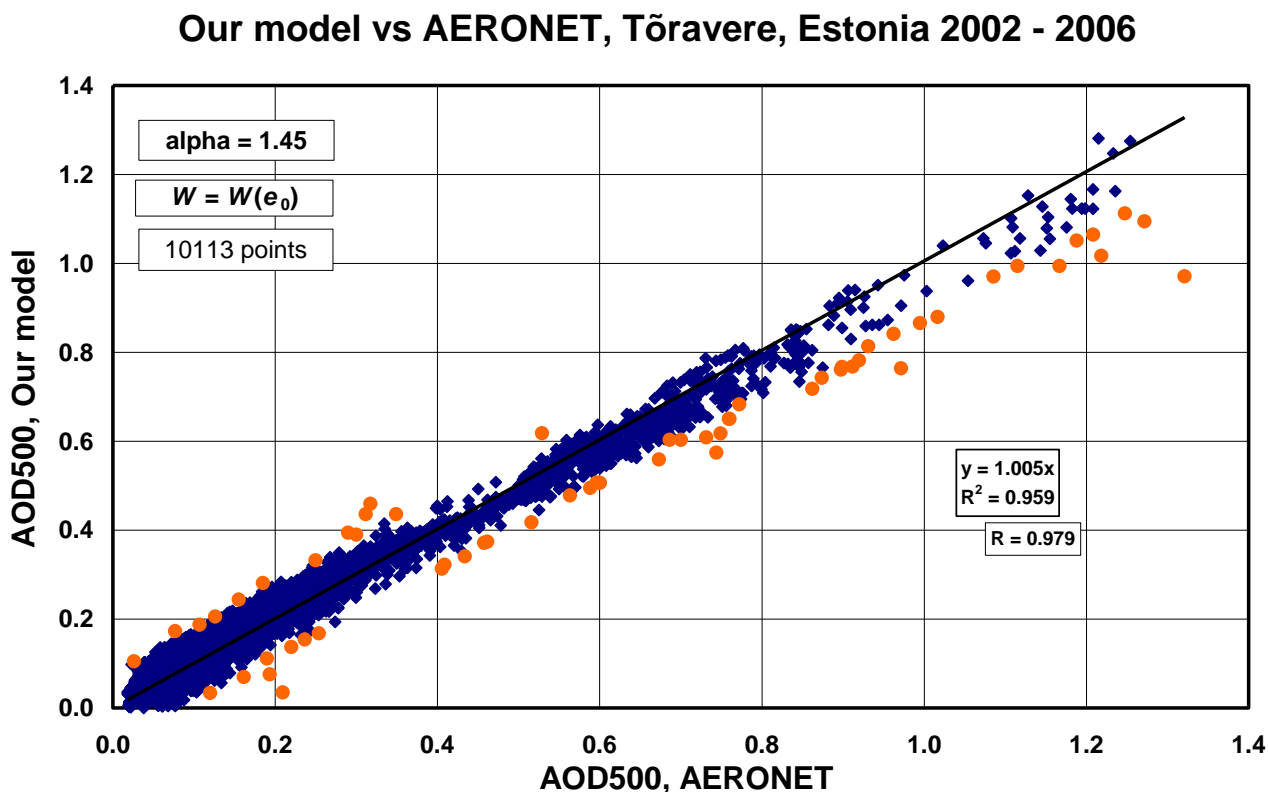
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (AOD500_{\text{Ourn}} - AOD500_{\text{AERONET}, n})^2}{n - 1}}, \quad (3.1)$$

kus n on vastavasse gruppi kuuluvate mõõtmiste arv. Lisaks arvutasime samade gruppide korral hälbed ka Moskva mudeli ja AERONET mõõtmiste vahel. Tulemused on kantud tabelisse 2.

Tabel 2. Meie mudeli ja Moskva mudeli AOD500 hälbed AERONET mõõtmistega 2002 - 2006.

AOD500 vahemik	0.0 ... 0.2	0.2 ... 0.4	0.4 ... 0.6	0.6 ... 0.8	0.8 ... 1.0	1.0 ... 1.4
Mõõtmiste arv	8049	1329	350	283	65	37
Meie mudeli hälbed	0.0287	0.0270	0.0303	0.0444	0.0732	0.1104
Moskva Ülikooli mudeli hälbed	0.0282	0.0353	0.0331	0.0415	0.0843	0.1357

Tabelist 2 näeme, et kõigest marginaalne osa mõõtmisi on olnud väärtustelt suuremad kui $AOD500 = 0.4$. Üle 9300 mõõtmisseeria $AOD500$ väärtused jäävad vahemikku $0.0 < AOD500 < 0.4$. Tabel 2 kinnitab meie mudeli suhteliselt paremat kokkulangevust AERONET mõõtmistega, mida näitavad standardhälvete väiksemad väärtused, võrreldes Moskva Ülikooli standardhälvetega. Tõsi, enim punkte leiduvas grupis on see pisut suurem, et mitte öelda väga lähedane. Edasi uurisime igast grupist 10 kõige suurema hälbe mõõtmist ning kandsime tulemused graafikule (joonis 10).



Joon. 10. Meie mudeli poolt leitud $AOD500$ võrdlus AERONET mõõtmistega kogu perioodi jaoks. Välja on toodud 60 enim hälbivat punkti kuuest $AOD500$ grupist.

Jooniselt 10 on näha, et suuremate $AOD500$ väärtuste korral (sombusemad ilmad), $AOD500 > 0.6$ mudel pigem alahindab reaalseid väärtuseid, väiksemate väärtuste korral (ilusamad ilmad) toimuvad väiksemad kõrvalekalded nii üle- kui ka alahindamise suunas. Neist kuuekümnest punktist on koostatud tabel, mis on paigutatud lissasse 2. Tabelist (Lisa 2) leiab joonisel 10 olevate oranžide punktide mõõtmisaja, nii AERONET kui meie mudeli poolt leitud $AOD500$ väärtuse, Päikese kõrguse ja Ångströmi α mõõtmishetkel. Lisaks on iga punkti kohta veel kirjas AERONET ning valemi (2.14) järgi leitud veeaurusisaldused ning massiarvu m , Päikese otsekiirguse S_m ning integraalse läbipaistvuse p_2 väärtused.

Suurimate kõrvalekalduvate punktide kohta võib neist andmetest järeldada, et selgemate ilmade korral (**AOD500** väiksem) on antud punktidele vastavad Päikese kõrgused ka suhteliselt madalad ($11^\circ < h < 24^\circ$), mis viitab hommikustele ja õhtustele mõõtmistele. Samas leidub ka punkte, kus Päike paistab kõrgemalt (näiteks $h = 43^\circ$). Täheldada võib ka asjaolu, et väiksemate **AOD500** väärtuste korral on ka Ångströmi eksponendid suhteliselt madalad, mis viitab atmosfääris leiduvatele suurematele osakestele. Kui vaadelda graafiku (joonis 10) parempoolset osa ehk suuremate sumedustega suurimaid kõrvalekaldeid, siis neil puhkudel on integraalne atmosfääri läbipaistvus väga nõrk (p_2 vähenenud kuni **0.46**ni). Ångströmi lainepikkuse eksponendi väärtused on sellistel juhtudel ka suuremad, kuid püsivad keskmistes piirides ($1.3 < \alpha < 2.0$). Põhjust suuremateks kõrvalekalleteks võib otsida ka veeaurisisalduse määramisest. AERONET mõõdetud ning valemi (2.14) järgi leitud veeaurisisaldus jälgib küll sama tendentsi, kuid kohati on see ka erinev (näiteks 16.07.2003, kell 03:59 UTC, $W_{AER} = 2.61$, $W_{e0} = 3.54$). Päikesekõrgus on aga joonise parempoolses osas paiknevate punktide kohta väga muutuv.

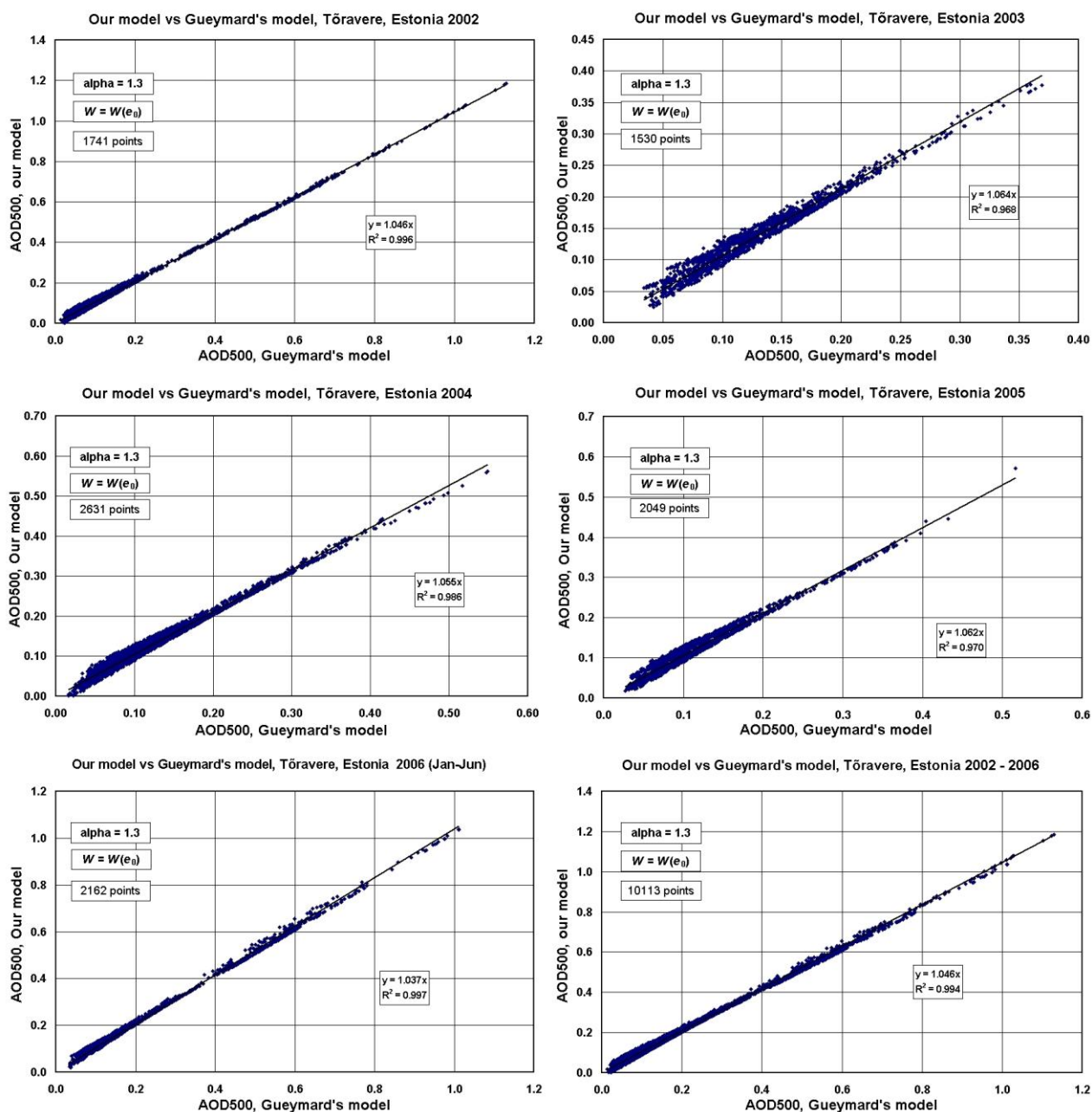
Olgu veelkord mainitud, et joonisel 10 kujutatud oranžid punktid kirjeldavad äärmuslikke mudeli kõrvalekaldeid ning neid on kõigest kuuskümmend **10 113**st ehk **0.6%**. Üldine korrelatsioon on väga hea, mudel kirjeldab kogu perioodi keskmiselt **0.5%** erinevusega kindlustades kõrge korrelatsiooni: $R = 0.979$.

3. 3. Võrdlus Gueymardi mudeliga

Viimaseks võrdluseks on tehtud meie mudeli võrdlus USA-Prantsuse atmosfäärioptiku Chr. Gueymardi mudeliga. Väga keeruka mudeli järgi **AOD500** arvutused on teostatud Oleg Okulovi poolt. Mudeli algtingimused on samad, mis meie mudeli kohta (veeaurisisaldus maapealse veeaururõhu järgi, Päikese kõrgus ja muud sisendparameetrid vastavatest AERONET või aktinomeetri mõõtmisseeriastest). Gueymardi (1998) mudel on eripärane selle poolest, et lainepikkuse eksponent on fikseeritud väärtusega, $\alpha = 1.3$. Sel juhul tegime läbi analüüsi, kus ka meie mudeli sisendiks oli $\alpha = 1.3$. Fikseerides valemis (2.15) Ångströmi eksponent, saame arvutusteks oluliselt lihtsama valemi:

$$\text{AOD}(1.3, 500) = p_2^{-0.4} \left(1.394W^{-0.026} \ln(p_2) - 0.247W^{0.133} \right). \quad (3.2)$$

Sama tulemuse saame, kui korrutame valemi (2.11) läbi hajuskiirgust arvestava teguriga: $0.75 p_2^{-0.4}$. Fikseeritud Ångströmi eksponendiga ($1.0 < \alpha < 2.0$) valemid leiab käesoleva magistriröö lisast 3. Valemi (3.2) ning Gueymardi mudeli järgi rehkendatud **AOD500** võrdlus on esitatud joonisel 11.



Joon. 11. Meie mudeli ja Gueymardi mudeli AOD500 võrdlus aastate kaupa ning kogu perioodi kohta. Ängströmi koefitsient on fikseeritud, $\alpha = 1.3$.

Jooniselt 11 saame kinnitust, et keerukas ning palju tingimusi arvestav Gueymardi mudel korreleerub meie mudeliga suurepäraselt. Eesti tingimuste jaoks on täheldada konstantset ülehindamist meie mudeli poolt, kuid determinatsioonikoefitsient püsib kõigi perioodide kohta kõrgel, keskmiselt $R^2 = 0.99$. Töö autor saab arvestatava teadmise, et kolmas sõltumatu võrdlusmudel (Gueymard, 1998) kinnitab meie mudeli võimet kirjeldada Eesti tingimustes aerosooli optilist paksust hästi, paremini kui seda teeb Moskva Ülikooli mudel ning Gueymardi enda mudel.

4. TÖÖ JÄRELDUSED

Käesoleva magistritöö põhitulemuseks on valem (2.15), mis kirjeldab aerosooliosakeste optilist paksust lainepikkusel $\lambda = 500 \text{ nm}$. Valemi sisendparameetriteks on atmosfäärisamba veeaurusisaldus W , integraalne läbipaistvus p_2 ning Ångströmi lainepikkuse eksponent α .

$$\text{AOD}(\alpha, 500) = 0.75(1.1^\alpha) p_2^{-0.4} \cdot$$

$$\cdot \left(0.758\alpha - 0.658 \right) W^{(-0.017\alpha - 0.004)} \ln(p_2) + (-0.149\alpha - 0.097) W^{(-0.024\alpha + 0.165)} .$$

Valem on tuletatud, kasutades originaalmudelina Moskva Ülikooli oma. Tulemus on kasutatav AOD kiireks hinnanguks ning AOD500 aegridade koostamiseks või pikendamiseks perioodidel kus need mõõtmised pole olnud võimalikud.

Töö teised tähtsamad järeldused on toodud järgnevas loetelus.

1. Kasutades Ångströmi valemit, saame sumedusteguri β ja **AOD500** vahel järgneva seose:
$$\text{AOD}(\alpha, 500) = 2^\alpha \beta.$$
2. On esitatud alternatiivne **AOD500** arvutuskeem sisendparameetrite, **BAOD**, W ja α korral. Antud skeem võimaldab leida mistahes lainepikkusega spektraalse aerosooliosakeste optilise paksuse suhte integraalsesse optilisse paksusesse:
3. $\text{AOD}(\alpha, 500) = A_B \text{BAOD}_2 = 1.1^\alpha 0.943 e^{0.423\alpha} W^{-0.02\alpha} \text{BAOD}_2.$
4. Atmosfääri aerosooliosakeste arvutusvalemi täiustamisel on sobiv kasutada Päikese ümbruse hajuskiirguse arvestamiseks tegurit: $0.75 p_2^{-0.4}$.
5. Arvutuste kontrollil AERONET mõõtmistega Tõraveres ilmneseid kahtlased perioodid: **6.09–30.10.2003** ja **3.09–18.09.2005**, kokku **437** vaatlust **31-l** päeval, mis jätsime edasise analüüsist välja.
6. Võrreldes meie mudeli ja Moskva originaalmudeli regressioonanalüüsi AERONET mõõtmistega, on korrellatsioon kõrgem meie mudelil AERONET-iga, standardviga väiksem ning keskmine kokkulangevus lähedasem tegelikele mõõtmistele.
7. Võrreldes meie mudelit vahetult Moskva Ülikooli mudeliga, annab meie mudel alati keskmiselt väiksemaid väärtusi, kõige suuremad erinevused ilmnevad ekstreemsetes atmosfääriseisundites, kus veeauru on väga vähe (külm talveilm) või väga palju (väga soe ja niiske suveilm). Moskva Ülikooli originaalmudel ei arvesta Päikese ümbruse hajuskiirgust, mis viib väga sumedate päevade **AOD** hindamise ebatäpsemaks.

8. Nii meie mudel kui Moskva Ülikooli mudel on AERONET mõõtmiste järgi jaotatud **AOD500** järgi gruppideks, sammuga **AOD500 = 0.2**. Analüüsitud on iga grupi ruutkeskmist erinevust AERONET mõõtmistest. Meie mudel annab pisut väiksemad gruppidesisesed erinevused kui Moskva originaalmudel.
9. Võrreldes meie mudelit AERONET mõõtmistega, saame kogu modelleerimisperioodi (**2002–2006**) jaoks (kokku **10 113** mõõtmist) suurepärase kokkulangevuse, kus mudel keskmiselt ülehindab reaalseid mõõtmisi vaid **0.5%** kindlustades sealjuures kõrge korrelatsiooni: **$R = 0.979$** .
10. Kolmanda sõltumatu mudeliga (Gueymard) meie mudelit võrreldes, on regressiooniline kokkulangevus ideaalilähedane. Eesti tingimuste jaoks meie mudel keskmiselt ülehindab **4.6%** Gueymardi mudeli järgi leitud **AOD500**, kuid hajuvust kirjeldav determinatsiooni-koefitsient hiilgav: **$R^2 = 0.994$** .

Tänuavaldused

Käesoleva magistritöö autor soovib tänada:

- TÜ keskkonnanäüsika instituut, magistrantuuri koha eest,
- Hanno Ohvril, lõputöö juhendamise eest,
- Oleg Okulov, spetsiifiliste arvutuste eest,
- Hilda Teral, konsultatsioonide eest,
- Aili Linnas ja Karin Tuvikene, tehnilise abi eest,
- Olavi Kärner, Madis Sulev, Viivi Russak, Ain Kallis, Anne Jõeveer, nii AERONET, aktinomeetria- ja meteomõõtmiste korraldamise ja kättesaadavaks tegemise eest.

Tartus

30. mai 2007

M. Kannel

Martin Kannel

Modeling of spectral aerosol optical depth

Summary

This 3+2 master thesis consists of three main chapters and deals with investigation and modeling of atmospheric aerosol optical depth (AOD). Starting this work, a goal was set to develop a single formula, which would allow calculation of aerosol optical depth at wavelength 500 nm using only broadband actinometric and standard meteorologic input parameters from Tõravere, Estonia.

As a starting-point to our formula we have used a AOD550 model from Moscow University proposed by Tarasova and Yarkho. We simplified and corrected it in order to get a better fit with AERONET measurements at Tõravere during 2002–2006. The AERONET Tõravere database consists of 10 550 measurements.

As a first step of our research, a compact formula to calculate AOD500 was developed. The input parameters for the formula are: 1) Ångström's wavelength exponent, α , 2) precipitable water vapor, W , 3) atmospheric integral transparency coefficient (AITC), p_2 .

Further, for a better consideration of circumsolar radiation, we modified our formula adding a linear term and a power term.

Testing our model for prediction of the AERONET Tõravere observations during 2002–2006, we found that in September and October 2003, and in September 2005, there were two sub-series of measurements with unfoundedly high AOD500 values compared to the considerably lower ones predicted by the coefficient of transparency p_2 . This discrepancy between measured and predicted AOD500 values raised serious doubts about a possible restriction inside the AERONET photometer's tube during these sub-series (e.g. an insect like spider, which screens path of solar rays to the radiation detector in the bottom of the open tube). Our consideration is to remove these sub-series (437 observations) from the entire 2002-2006 database. Further database consists of 10 113 observations.

Our model, compared to the initial Tarasova-Yarkho one, secured smaller variation of predicted AOD500 values around the measured values.

Testing our model against a more complex and Gueymard's model gave an almost absolute correlation, $R^2 = 0.994$. However, results obtained with Gueymard's model were systematically, lower compared to our model, in the average by 4.6 %. Trusting AERONET Tõravere measurements we can declare that Gueymard's model underestimates reality by approximately 5 %.

Kasutatud kirjandus

- Ångström, A. (1929) On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air. *Geografiska Annaler* **11B**, 157–166.
- Bohren, C. F. and Clothiaux, E. E. (2006) *Fundamentals of Atmospheric Radiation*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Gueymard, C. (1998) Turbidity determination from broadband irradiance measurements: a detailed multicoefficient approach. *Journal of Applied Meteorology* **37**, 414–435.
- Jacobson, M. Z. (2005) *Fundamentals of Atmospheric Modeling*. Cambridge University Press.
- Kannel, M., Ohvril, H., Okulov, O. and Teral, H. (2006) A simple broadband parameterisation of spectral aerosol optical depth. In: *Conference on Visibility, Aerosols, and Atmospheric Optics*, p. 36. Vienna, Austria.
- Kannel, M., Ohvril, H., Teral, H., Russak, V. and Kallis, A. (2007) A simple broadband parameterisation of columnar aerosol optical thickness. *Eesti Teaduste Akadeemia Toimetised. Ökoloogia*, **56/1**, 57-68.
- Lenoble, J. (1993) *Atmospheric radiative transfer*. Deepak Publishing.
- Matveev, L. (1984) *Kurs obštšei meteorologii*, Gidrometeoizdat, Leningrad.
- Mürk, H. (1967) Atmosfääri läbipaistvusest ja Forbes'i efektist. In: *Päike, Maa ja atmosfäär*, (Mürk, H.), pp 5-17. Valgus, Tallinn.
- Ohvril, H., Okulov, O. and Teral, H. (1999) The atmospheric integral transparency coefficient and the Forbes effect. *Solar Energy* Vol. **66**, No **4**, 305–317.
- Okulov, O. (2003). *Variability of atmospheric transparency and precipitable water in Estonia during last decades. PhD dissertation*. Tartu University Press.
- Okulov, O. (2006). *Atmosfäärikorrektsiooni meetodite kohaldamine Eesti veekogude uurimisel*. Järeldoktorantuuri aruanne.
- Tarasova, T. A. and Yarkho, E. V. (1991) Determination of atmospheric aerosol optical thickness from land-based measurements of integral direct solar radiation. *Soviet Meteorology and Hygrology*, No **12**, 53–58.

Lisa 1. Moskva Ülikooli AOD550 arvutusmudeli abifunktsioonid ja väärtused

AAA	AAB	2*BAA	BAB	ABA	ABB	2*BBA	BBB	α
0,1870	-0,1891	1,7598	-0,0092	0,8063	-0,0020	0,8196	-0,0334	1,0
0,1874	-0,1880	1,7574	-0,0093	0,7927	-0,0028	0,8810	-0,0317	1,1
0,1878	-0,1870	1,7552	-0,0094	0,7806	-0,0035	0,9410	-0,0301	1,2
0,1881	-0,1860	1,7533	-0,0095	0,7695	-0,0042	0,9998	-0,0287	1,3
0,1884	-0,1851	1,7514	-0,0096	0,7594	-0,0049	1,0575	-0,0273	1,4
0,1887	-0,1843	1,7497	-0,0097	0,7502	-0,0054	1,1143	-0,0261	1,5
0,1889	-0,1836	1,7481	-0,0098	0,7416	-0,0060	1,1701	-0,0249	1,6
0,1892	-0,1828	1,7466	-0,0098	0,7336	-0,0065	1,2251	-0,0238	1,7
0,1894	-0,1822	1,7452	-0,0099	0,7262	-0,0070	1,2793	-0,0228	1,8
0,1897	-0,1815	1,7438	-0,0100	0,7192	-0,0074	1,3328	-0,0218	1,9
0,1899	-0,1809	1,7426	-0,0100	0,7127	-0,0079	1,3856	-0,0209	2,0

Funktsioonid **BAA** ja **BBA** on korrutatud teguriga 2, sest üldvalemisse (2.1) asendades on vaja vastavad funktsioonid korrutada selle sama teguriga.

Valemi (2.1) kohaselt sõltuvad kahetähelised funktsioonid kolmetähelistest järgnevalt:

$$AA = AAA W^{AAB}$$

$$BA = BAA W^{BAB} - 1$$

$$AB = ABA W^{ABB} - 1$$

$$BB = BBA W^{BBB} - 1$$

Kolmetähelised funktsioonid sõltuvad vaid Ångströmi eksponendist:

$$AAA = 0.1870 \alpha^{0.0225}$$

$$AAB = 0.8109 \alpha^{0.0145} - 1$$

$$BAA = 0.8799 \alpha^{-0.0142}$$

$$BAB = 0.9908 \alpha^{-0.0012} - 1$$

$$ABA = 0.8063 \alpha^{-0.1780}$$

$$ABB = 0.9980 \alpha^{-0.0085} - 1$$

$$BBA = 0.4098 \alpha^{0.7575}$$

$$BBB = 0.9666 \alpha^{0.0186} - 1$$

**Lisa 2. Kümne suurima hälbega mõõtmispunktide koondtabel
kuuest AOD500 piirkonnast**

Lisa 3. Meie mudeli lühivalemid fikseeritud Ångströmi eksponendi korral

$$\text{AOD}(1.0, 500) = p_2^{-0.4} \left(1.168W^{-0.021} \ln(p_2) - 0.203W^{0.14} \right)$$

$$\text{AOD}(1.1, 500) = p_2^{-0.4} \left(1.242W^{-0.023} \ln(p_2) - 0.217W^{0.138} \right)$$

$$\text{AOD}(1.2, 500) = p_2^{-0.4} \left(1.318W^{-0.025} \ln(p_2) - 0.232W^{0.135} \right)$$

$$\text{AOD}(1.3, 500) = p_2^{-0.4} \left(1.394W^{-0.026} \ln(p_2) - 0.247W^{0.133} \right)$$

$$\text{AOD}(1.4, 500) = p_2^{-0.4} \left(1.473W^{-0.028} \ln(p_2) - 0.262W^{0.131} \right)$$

$$\text{AOD}(1.45, 500) = p_2^{-0.4} \left(1.512W^{-0.029} \ln(p_2) - 0.27W^{0.129} \right)$$

$$\text{AOD}(1.5, 500) = p_2^{-0.4} \left(1.553W^{-0.03} \ln(p_2) - 0.277W^{0.128} \right)$$

$$\text{AOD}(1.6, 500) = p_2^{-0.4} \left(1.634W^{-0.032} \ln(p_2) - 0.293W^{0.126} \right)$$

$$\text{AOD}(1.7, 500) = p_2^{-0.4} \left(1.716W^{-0.033} \ln(p_2) - 0.309W^{0.123} \right)$$

$$\text{AOD}(1.8, 500) = p_2^{-0.4} \left(1.8W^{-0.035} \ln(p_2) - 0.325W^{0.121} \right)$$

$$\text{AOD}(1.9, 500) = p_2^{-0.4} \left(1.885W^{-0.037} \ln(p_2) - 0.342W^{0.118} \right)$$

$$\text{AOD}(2.0, 500) = p_2^{-0.4} \left(1.972W^{-0.039} \ln(p_2) - 0.359W^{0.116} \right)$$

1.0 < AOD500 < 1.4, kokku 37 vaatlust, neist 10 suurima hälbega

Kuupäev	Kell	Mudel	Aeronet	Z	h	alpha	W (AER)	W (e ₀)	m	S _m	p ₂
29.08.2002	8:46:28	1.1123	1.2475	51.7285	38.2715	1.3458	2.1171	2.2264	1.6238	0.3724	0.4687
29.04.2006	12:00:57	1.0644	1.2085	48.2664	41.7336	1.7995	1.0567	0.7356	1.4889	0.4453	0.4980
29.04.2006	12:24:01	1.0512	1.1880	50.2125	39.7875	1.8762	1.0474	0.7356	1.5715	0.4290	0.5007
29.04.2006	12:52:31	1.0941	1.2716	52.9698	37.0302	1.8103	1.0563	0.7356	1.6506	0.3986	0.4920
29.04.2006	13:06:45	0.9939	1.1152	54.4705	35.5295	1.9027	1.0657	0.7356	1.7265	0.4118	0.5127
29.04.2006	13:13:02	0.9939	1.1670	55.1559	34.8441	1.8889	1.0574	0.7356	1.7265	0.4118	0.5127
29.04.2006	13:44:03	1.0167	1.2186	58.7143	31.2857	1.8200	1.0717	0.7356	1.9121	0.3682	0.5078
29.04.2006	14:26:40	0.9708	1.3212	63.9638	26.0362	1.6746	1.0624	0.7356	2.3778	0.3073	0.5177
29.04.2006	14:40:54	0.9704	1.0855	65.7802	24.2198	1.8108	1.0668	0.7356	2.4008	0.3043	0.5178
29.04.2006	15:14:49	0.8797	1.0166	70.1810	19.8190	1.8234	0.9961	0.7356	2.9459	0.2668	0.5382

0.8 < AOD500 < 1.0, kokku 65 vaatlust, neist 10 suurima hälbega

Kuupäev	Kell	Mudel	Aeronet	Z	h	alpha	W (AER)	W (e ₀)	m	S _m	p ₂
26.04.2006	14:23:26	0.7680	0.9119	64.3045	25.6955	1.5243	0.8672	0.7400	2.4223	0.3686	0.5653
28.04.2006	9:21:52	0.7174	0.8623	45.0575	44.9425	1.7730	0.8248	0.8214	1.4034	0.5859	0.5764
29.04.2006	4:40:01	0.7425	0.8739	73.9968	16.0032	1.8369	0.9110	0.7356	3.6386	0.2485	0.5720
29.04.2006	4:54:17	0.7665	0.8988	72.1235	17.8765	1.7403	0.9230	0.7356	3.1008	0.2880	0.5658
29.04.2006	5:08:30	0.7638	0.9715	70.2580	19.7420	1.6064	0.9422	0.7356	3.0802	0.2910	0.5665
29.04.2006	5:57:01	0.8653	0.9949	63.9789	26.0211	1.6347	0.9653	0.7356	2.2990	0.3519	0.5416
29.04.2006	6:51:56	0.8411	0.9623	57.2753	32.7247	1.8415	0.9640	0.7356	1.8790	0.4320	0.5473
29.04.2006	15:29:05	0.8133	0.9313	72.0482	17.9518	1.8198	0.9518	0.7356	3.2317	0.2597	0.5541
29.04.2006	15:43:20	0.7610	0.8974	73.9142	16.0858	1.8665	0.9007	0.7356	3.6105	0.2445	0.5672
5.05.2006	15:18:45	0.7817	0.9197	69.2914	20.7086	1.7562	1.0635	0.8999	2.9698	0.2910	0.5582

0.6 < AOD500 < 0.8, kokku 283 vaatlust, neist 10 suurima hälbega

Kuupäev	Kell	Mudel	Aeronet	Z	h	alpha	W (AER)	W (e ₀)	m	S _m	p ₂
12.08.2002	09:20:09	0.6030	0.6865	44.6560	45.3440	1.7194	2.6341	2.1979	1.4063	0.6030	0.5878
12.08.2002	09:27:20	0.6030	0.7002	44.3456	45.6544	1.7080	2.6656	2.1979	1.4063	0.6030	0.5878
13.08.2002	11:20:00	0.6172	0.7492	45.0658	44.9342	1.3965	2.0004	2.0470	1.4194	0.5956	0.5853
14.08.2002	12:04:50	0.6830	0.7722	48.1744	41.8256	1.6978	2.5326	2.3437	1.4886	0.5451	0.5644
25.08.2002	14:19:58	0.5586	0.6732	65.8294	24.1706	1.2812	1.8543	2.0338	2.2833	0.4476	0.6023
29.08.2002	14:09:06	0.6499	0.7595	65.8539	24.1461	1.4164	2.0360	2.2264	2.5175	0.3693	0.5744
26.04.2006	9:26:15	0.6084	0.7315	45.5340	44.4660	1.7268	0.9601	0.7400	1.4352	0.6288	0.6086
1.05.2006	4:28:42	0.5063	0.6004	74.9312	15.0688	2.0677	0.5297	0.4736	3.7829	0.3502	0.6482
1.05.2006	14:55:21	0.5743	0.7440	67.1649	22.8351	2.0472	0.5795	0.4736	2.4274	0.4671	0.6272
5.05.2006	14:44:49	0.6500	0.7602	64.8681	25.1319	1.7784	0.9494	0.8999	2.3893	0.4161	0.5929

0.4 < AOD500 < 0.6, kokku 350 vaatlust, neist 10 suurima hälbega

Kuupäev	Kell	Mudel	Aeronet	Z	h	alpha	W (AER)	W (e ₀)	m	S _m	p ₂
13.08.2002	14:29:45	0.3737	0.4615	63.3522	26.6478	1.6379	2.0042	2.0470	2.1252	0.5761	0.6615
28.03.2003	11:20:15	0.3714	0.4577	56.5800	33.4200	1.3363	0.9913	0.9244	1.8346	0.6627	0.6799
16.07.2003	03:59:29	0.3222	0.4090	74.4747	15.5253	2.0382	2.6142	3.5416	3.7945	0.3815	0.6666
6.04.2004	15:08:35	0.4780	0.5636	75.3313	14.6687	1.6070	1.0160	0.8620	3.6447	0.3579	0.6453
7.04.2004	05:43:07	0.3130	0.4057	72.7115	17.2885	0.9880	0.7004	0.6926	3.6789	0.4693	0.7073
3.11.2005	11:13:39	0.4174	0.5160	75.0085	14.9915	1.2684	1.1048	0.9339	3.6737	0.3867	0.6637
3.11.2005	12:13:39	0.6177	0.5290	78.4823	11.5177	1.1268	1.1005	0.9339	4.8877	0.2066	0.6013
10.03.2006	12:55:48	0.3408	0.4339	69.1841	20.8159	1.3755	0.3489	0.4455	2.7756	0.5652	0.7060
1.05.2006	4:14:28	0.4949	0.5884	76.7878	13.2122	2.0650	0.5294	0.4736	4.3163	0.3147	0.6518
1.05.2006	4:31:13	0.5068	0.5964	74.6018	15.3982	2.0676	0.5280	0.4736	3.7216	0.3553	0.6480

0.2 < AOD500 < 0.4, kokku 1329 vaatlust, neist 10 suurima hälbega

Kuupäev	Kell	Mudel	Aeronet	Z	h	alpha	W (AER)	W (e ₀)	m	S _m	p ₂
28.06.2002	17:23:39	0.0348	0.2093	78.4977	11.5023	0.5634	1.2642	1.6486	4.8548	0.6103	0.8071
29.05.2003	15:51:01	0.1372	0.2200	69.0404	20.9596	0.4420	1.2809	1.1692	2.5931	0.7209	0.7675
19.04.2004	11:20:44	0.3897	0.3000	48.5776	41.4224	0.7392	0.9641	0.9505	1.5124	0.7181	0.6729
10.10.2005	10:32:12	0.1680	0.2539	65.2861	24.7140	0.7181	1.5325	1.6650	2.3582	0.7049	0.7458
13.10.2005	11:16:26	0.1538	0.2365	67.8871	22.1129	0.9752	1.2157	1.4623	2.5546	0.6977	0.7550
12.03.2006	6:46:53	0.3320	0.2498	75.0512	14.9488	0.8793	0.3551	0.4070	3.7942	0.4660	0.7111
12.03.2006	7:31:38	0.4358	0.3493	70.4390	19.5610	0.8028	0.3814	0.4070	2.8435	0.4947	0.6742
12.03.2006	7:40:14	0.4358	0.3117	69.6347	20.3653	0.7419	0.3790	0.4070	2.8435	0.4947	0.6742
12.03.2006	8:10:14	0.4592	0.3174	67.0723	22.9277	0.6275	0.3856	0.4070	2.5547	0.5184	0.6664
12.03.2006	9:10:15	0.3940	0.2899	63.2751	26.7249	0.7882	0.3861	0.4070	2.2240	0.6102	0.6886

0.0 < AOD500 < 0.2, kokku 8049 vaatlust, neist 10 suurima hälbega

Kuupäev	Kell	Mudel	Aeronet	Z	h	alpha	W (AER)	W (e ₀)	m	S _m	p ₂
29.06.2002	03:12:44	0.0336	0.1199	78.3438	11.6562	1.2134	1.2669	1.8931	4.8295	0.6041	0.8042
19.05.2003	04:03:15	0.1112	0.1898	74.2582	15.7418	1.0136	1.2842	1.2517	3.5771	0.6361	0.7776
14.06.2003	17:09:17	0.0757	0.1935	77.1521	12.8479	0.8306	1.4806	1.5322	4.4762	0.5896	0.7892
14.06.2003	17:20:09	0.0697	0.1614	78.4408	11.5592	0.9849	1.3448	1.5322	4.9127	0.5659	0.7921
17.06.2004	06:30:48	0.1869	0.1068	52.5967	37.4033	0.6327	1.3846	1.5220	1.6762	0.8059	0.7399
15.08.2004	12:39:48	0.1046	0.0260	51.6384	38.3616	0.8785	1.4655	1.4138	1.6111	0.8914	0.7777
24.05.2005	12:41:52	0.2808	0.1851	46.2323	43.7677	1.2026	2.4862	2.0217	1.4490	0.7724	0.6956
15.07.2005	4:03:30	0.1727	0.0767	73.8981	16.1019	0.9011	1.7853	2.1653	3.5744	0.5424	0.7373
6.02.2006	9:14:20	0.2055	0.1261	75.3530	14.6470	1.1105	0.1896	0.2502	3.9110	0.5883	0.7706
18.03.2006	6:01:55	0.2438	0.1551	77.9975	12.0025	0.5541	0.5956	0.5032	4.7052	0.4566	0.7409