

# TUULE PROFIILIST MAALÄHEDASES ÕHUKIHIS TARTU ÜMBRUSES TEOSTATUD VAATLUSTE PÕHJAL

H. Liidemaa

Geofüüsika kateeder

## Sissejuhatus

Maa lähedal olevate õhukihtide füüsika üheks oluliseks probleemiks on tähtsamate meteoroloogiliste elementide, nagu temperatuuri, õhuniiskuse ja tuule režiimi seaduspärasuste uurimine aluspinna vahetu mõju all olevas õhukihis.

Vaadates meteoroloogiliste elementide profiile, s. o. nende elementide jaotumist vertikaalsihis ning nende ajalisi muutusi mitmesugustes ilmastikutingimustes, saame ettekujutuse maa lähedal asuvates õhukihtides esinevatest füüsikalistest protsessidest. Viimased on tihedalt seotud aluspinnaga, sõltuvad suurel määral aluspinna omadustest ja selles toimuvatest protsessidest. Selle poolest erinebki maa lähedal olev õhukiht kõrgemal olevatest.

Maapinna tugeva mõju tõttu esinevad maalähedases õhukihis, eriti tema alumises osas, meteoroloogiliste elementide suured vertikaalsed ja horisontaalsed gradiendid ning suured amplituudid.

Maalähedase õhukihi uurimine toimub sagedasti gradientvaatluste alusel. Gradientvaatlused, s. o. õhutemperatuuri, õhuniiskuse ja tuule kiiruse mõõtmised maalähedases õhukihis teatud kõrgustel võimaldavad leida mainitud meteoroloogiliste elementide vertikaalse jaotuse seaduspärasusi, arvutada turbulentsuse teooria alusel turbulentsi koefitsiendi ning soojusvoogu õhku, määrata konaruse parameetrit, stratifikatsiooni iseloomu jm.

Maalähedases õhukihis esineva soojuse ning tuule režiimi seaduspärasuste tundmine on suure praktilise tähtsusega, see annab võimaluse soojus- ja tuuleenergia ratsionaalseks kasutamiseks rahvamajanduses, eriti aga põllumajanduses, ning nende mõjustamiseks vajalikus suunas. Tuuleenergiat kasutatakse mitmesugustel tehnilistel aladel, tuult tuleb arvestada ehituste püstitamisel, linnade ja sanatooriumide planeerimisel, temperatuuri ja tuule režiimi ning sellega seoses arenevate protsesside selgitamine maalähedases õhukihis on looduse ümberkujundamise plaanide aluseks, on oluline õhumasside transformatsiooni ja öökülma probleemi lahendamisel jne. Temperatuuri ning tuule profiili seaduspärasuste

kindlakstegemine võimaldab maapinna lähedal toimetatud vaatluste põhjal määrata neid elemente kogu maalähedase õhukihi ulatuses kuni 20—30 m kõrguseni.

Käesoleva töö eesmärgiks on tuule profiili iseärasuste väljaselgitamine maalähedases õhukihis Tartu ümbrusest saadud andmeil ning mõningate profiili iseloomustavate valemite rakendatavuse kontrollimine Tartu kliima tingimustes.

## I. VAATLUSTE METOODIKA

Käesoleva uurimuse aluseks on 1959. a. juunis ning juulis Tartu lähedal Eesti NSV Teaduste Akadeemia Füüsika ja Astroномia Instituudi aktinomeetria laboratooriumi vaatlusväljakul korraldatud gradientvaatluste andmed. Vaatlusväljak asub lagedal tasasel maa-alal ja on ümbritsetud põldudega. Maapind oli kaetud 10—20 cm kõrguse rohtkattega.

Vaatlusi toimetati enamasti 5—7 päeva tagant, öösel iga kolme tunni, päeval pooleteise tunni järel, kokku 14 korda ööpäeva jooksul: kell 1.00, 4.00, 5.30, 7.00 jne. keskmise kohaliku aja järgi.

Tuule kiirust mõõdeti kõrgustel 0.25, 0.50, 1.00, 2.00, 4.00 ja 8.00 m kontaktanemomeetritega ning võrdluseks 0.50 ja 2.00 m käsianemomeetritega. Samaaegselt mõõdeti kiirgusbilanssi Janiševski bilansomeetriga, õhutemperatuuri 0.25, 0.50, 2.00, 4.00 ja 8.00 m kõrgusel (0.50 ja 2.00 m kõrgusel — aspiratsiooni-psühromeetritega, 0.25, 4.00 ja 8.00 m kõrgusel — elektriliste termomeetritega). Peale selle määrati vaatlusajal alumiste pilvede ning kogupilvituse hulk, pilvede liik, tuule suund 12 m kõrgusel tuulelipu järgi. Vaatluste tegemisel olid anemomeetrid sisse lülitatud 30 minutit, selle aja jooksul loeti temperatuuri 6 korda ning toimetati vahepeal ülejäänud vaatlusi.

Et tuule kiiruse ja õhutemperatuuri muutused on pulseeriva iseloomuga, ei anna üksikvaatlused õiget pilti vastava meteoroloogilise elemendi jaotumusest maalähedases õhukihis ega võimalda selle seaduspärasuste kindlaksmääramist. Juhuslike kõikumiste elimineerimiseks kasutatakse poole tunni tuule kiiruse ning õhutemperatuuri keskmisi väärtusi.

Vaatluste toimetamisel ning töötlemisel selgus, et päevastes tingimustes annavad elektrilised termomeetrid, võrreldes aspiratsiooni-psühromeetriga, päikesepaistelise ilmaga liiga kõrgeid temperatuure, ja seda arvatavasti tugeva kiirguse mõju ning puuduliku ventilatsiooni tõttu. Sel põhjusel on käesolevas töös temperatuurilolude analüüsimisel kasutatud öösel kõiki olemasolevaid andmeid, päeval aga vaid aspiratsiooni-psühromeetri järgi saadud tulemusi.

Vaatlusi tehti peamiselt selge ilmaga või keskmise pilvitusega päevadel. Suure pilvituse ja sademetega päevadel ei olnud võimalik vaatlusi teha, sest sademed häirivad bilansomeetri, kontakt-anemomeetrite ning elektriliste termomeetrite tööd. Vaatluspäevi oli 10.

## II. TUULE REŽIIM MAALÄHEDASES ÕHUKIHIS

### 1. Tuule kiiruse üldine iseloomustus maalähedases õhukihis.

Tuule kiirust maalähedases õhukihis iseloomustavad tabelis 1 esitatud andmed.

Esimeses reas on antud kõikide vaatlusandmete põhjal saadud keskmised kiirused. Peale selle on välja valitud nõrga ja tugeva tuulega päevad (à 3 päeva), vastavad 3-päeva keskmised tuule kiiruse andmed on teises ja kolmandas reas.

Nõrga tuulega päevadel ei ületanud tuule kiirus kogu päeva jooksul 3 m/s, olles keskmiselt 2.0 m/s, temperatuur oli suhteliselt kõrge, pilvitus öösel väga väike ning esines hästi väljakujunenud inversioon, päeval oli stratifikatsioon labiilne, pilvitus natuke suurem. Tugeva tuulega päevadel oli tuule kiirus kõigil vaatlusaegadel üle 3 m/s, keskmiselt 4,4 m/s, maksimaalselt 6.6 m/s. Temperatuur oli keskmisest madalam, pilvitus keskmine või alla keskmist, stratifikatsioon — kogu päeva jooksul indiferentsele lähedal. Meteoroloogilisi elemente nõrga ning tugeva tuule puhul, samuti keskmisi väärtusi kõikidel päevadel iseloomustab tabel 2. Erinevused kiirgusbilansis mainitud tuule kiiruste puhul ei olnud nimetamisväärsed.

Joonisel 1 on esitatud tuule kiiruse ööpäevane käik erinevatel kõrgustel kõikide päevade keskmiste andmete põhjal. Nagu joonis näitab, kasvab tuule kiirus kõrguse suurenemisel, kusjuures kõikidel kõrgustel esineb võrdlemisi hästi väljakujunenud ööpäevane kulg maksimumiga päeval ning miinimumiga öösel.

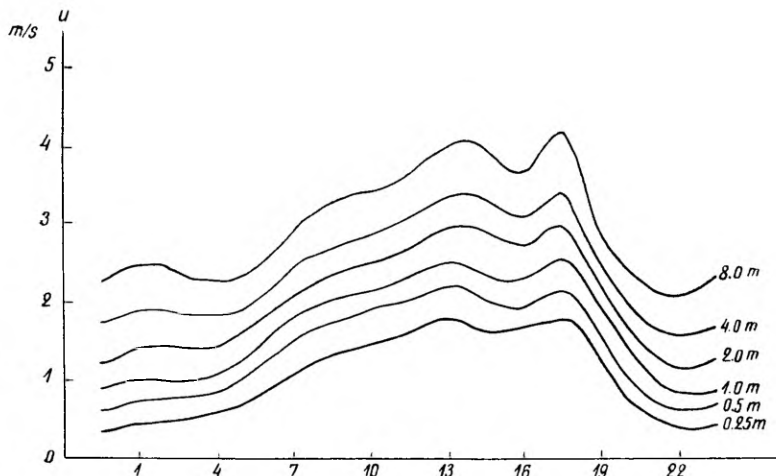
Tuule kiiruse muutust kõrguse suurenemisel maalähedases õhukihis antud momendil iseloomustab tuule kiiruse profiil. Joonisel 2 on esitatud keskmiste andmete põhjal joonestatud profiilid kellaaegade järgi. Vertikaalteljele on võetud kõrgused (m), horisontaalteljele — tuule kiirused (m/s) Esimese profiili kiiruse ühikud on märgitud allpool, iga järgmise profiili jaoks on kiiruse 0-punkt viidud paremale ning sellele kirjutatud juurde vastav kellaaeg. Ka joonise ülemises osas on igale kõverale kirjutatud juurde vastav kellaaeg. Nagu joonis näitab, esineb kõige intensiivsem kasv alumises poolemeetrisel õhukihis ning väheneb kiiresti kõrgemal.

Tuule kiiruse vertikaalse jaotumuse lähemaks uurimiseks on arvatud tuule kiiruse muutused 1 m kohta erinevatel kõrgustel (tuule kiiruse gradiendid m/s/m) Tabelis 3 on antud päeva keskmised tuule kiiruse gradiendid arvatud kõikide andmete põhjal ning eraldi nõrga ja tugeva tuulega päevadel. Joonis 3 iseloomustab gradiendi muutust kõrgusega kõikide päevade andmeil. Gradient on kõige suurem kihis 0.25—0.50 m. Kihis 0.50—1.00 on ta keskmiselt ligi 3 korda väiksem ning väheneb kõrgusega veelgi. 4 ja 8 m vahel on gradient keskmiste andmete põhjal 10 korda väiksem kui kõige alumises kihis. Seega väheneb gradient kõrgusega algul väga kiiresti, hiljem aga muutub vähe.

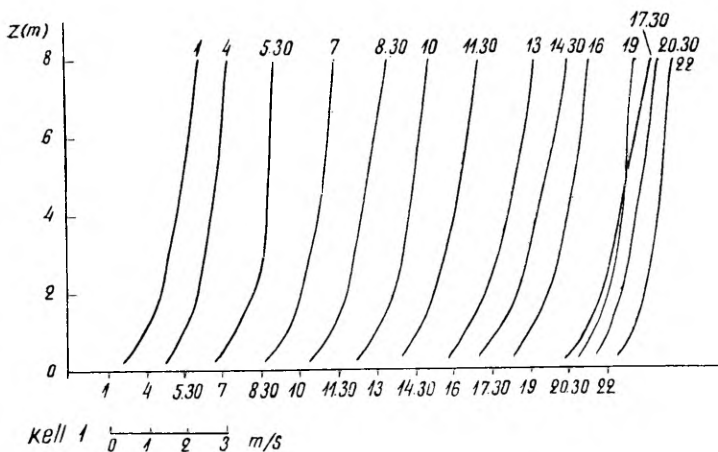
Tabel 1

## Tuule kiirus (m/s)

Kellaeg	1.00						4.00					
Kõrgus	0.25	0.5	1	2	4	8	0.25	0.5	1	2	4	8
Keskmine	0.4	0.7	1.0	1.4	1.9	2.5	0.5	0.8	1.0	1.4	1.8	2.2
Nõrk tuul	0.2	0.3	0.5	0.9	1.7	2.4	0.2	0.4	0.7	1.2	2.0	2.0
Tugev tuul	1.0	1.6	1.9	2.3	2.8	3.5	0.7	1.5	2.1	2.6	3.0	3.6
Kellaeg	5.30						7.00					
Keskmine	0.8	1.1	1.4	1.8	2.0	2.4	1.1	1.6	1.8	2.1	2.5	3.0
Nõrk tuul	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0	1.0	1.1	1.3	1.6	1.9	2.1
Tugev tuul	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	1.8	2.3	2.8	3.3	3.8	4.6
Kellaeg	8.30						10.00					
Keskmine	1.3	1.7	2.0	2.4	2.7	3.3	1.4	1.9	2.1	2.5	2.9	3.4
Nõrk tuul	0.7	0.9	1.0	1.2	1.5	1.6	1.1	1.4	1.5	1.8	2.1	2.4
Tugev tuul	1.9	2.2	2.5	3.0	3.4	4.5	2.1	2.4	2.7	3.1	3.6	4.5
Kellaeg	11.30						13.00					
Keskmine	1.6	2.0	2.3	2.7	3.1	3.7	1.8	2.2	2.5	3.0	3.4	4.1
Nõrk tuul	1.2	1.6	1.6	1.9	2.2	2.6	1.3	1.5	1.6	1.9	2.2	2.5
Tugev tuul	2.4	2.7	3.1	3.6	4.1	5.0	2.7	3.0	3.4	4.2	4.8	6.0
Kellaeg	14.30						16.00					
Keskmine	1.6	2.0	2.3	2.9	3.3	4.0	1.6	1.9	2.2	2.7	3.0	3.6
Nõrk tuul	0.9	1.1	1.2	1.5	1.8	2.0	0.6	0.6	0.7	1.0	1.3	1.4
Tugev tuul	2.3	2.7	3.0	3.8	4.3	5.5	2.2	2.5	3.0	3.6	4.1	5.1
Kellaeg	17.30						19.00					
Kõrgus	0.25	0.5	1	2	4	8	0.25	0.5	1	2	4	8
Keskmine	1.8	2.2	2.6	3.0	3.4	4.2	1.2	1.6	1.8	2.1	2.4	2.9
Nõrk tuul	1.0	1.2	1.2	1.6	2.0	2.2	1.2	1.3	1.6	2.0	2.2	2.6
Tugev tuul	1.9	2.3	2.7	3.2	3.7	4.8	2.2	2.5	2.8	3.2	3.6	4.4
Kellaeg	20.30						22.00					
Keskmine	0.6	0.9	1.1	1.4	1.8	2.3	0.3	0.6	0.8	1.1	1.6	2.1
Nõrk tuul	0.3	0.4	0.6	1.1	1.4	1.8	0.2	0.4	0.6	0.9	1.0	1.8
Tugev tuul	1.4	1.8	2.0	2.3	2.8	3.5	1.1	1.8	2.2	2.6	3.0	3.4

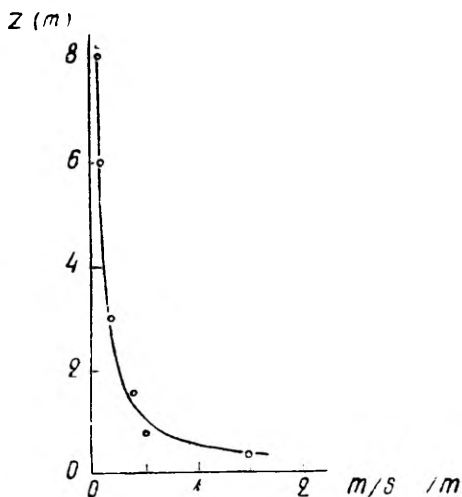


Joon. 1. Tuule kiiruse ööpäevane käik erinevatel kõrgustel.



Joon. 2. Tuule kiiruse profiilid (keskmised andmed).

Tabelis 4 on antud tuule kiiruse gradiendi keskmised väärtused kogu kihi jaoks kellaegade järgi. Kõrvutades neid andmeid tuule kiiruse andmetega, võib tähele panna, et tuule kiiruse kasvamisega suurenevad ka üldiselt kiiruse gradiendid, tuule kiiruse ja vastavate gradientide maksimumid ja miinimumid langevad ühele ja samale momendile. Torkab ainult silma, et nõrga tuule puhul esi-



Joon. 3. Tuule kiiruse gradiendi sõltuvus kõrgusest.

Tabel 2

Meteoroloogilised elemendid vaatluspäevadel 1959. a.

	Tuule kiirus m/s			Õhutempe- ratuur			Pilvitus			ri	
	öösel	päeval	öö-päeva keskm.	öösel	päeval	öö-päeva keskm.	öösel	päeval	öö-päeva keskm.	öösel	päeval
Kõik päevad	2.4	3.5	3.0	14.9	20.9	18.3	4/1	7/3	6/2	-1.2	0.2
Nõrk tuul	2.0	2.1	2.0	15.3	24.1	20.2	3/1	8/2	6/2	-2.3	0.4
Tugev tuul	3.7	5.0	4.4	13.5	21.0	17.7	6/4	4/2	5/3	0.0	0.1

Tabel 3

Tuule kiiruse keskmine gradient m/s/m

	Õhukiht (m)				
	0.25—0.50	0.50—1.00	1.00—2.00	2.00—4.00	4.00—8.00
Keskmine	1.49	0.53	0.40	0.19	0.14
Nõrk tuul	0.63	0.29	0.32	0.20	0.07
Tugev tuul	1.80	0.79	0.52	0.21	0.21

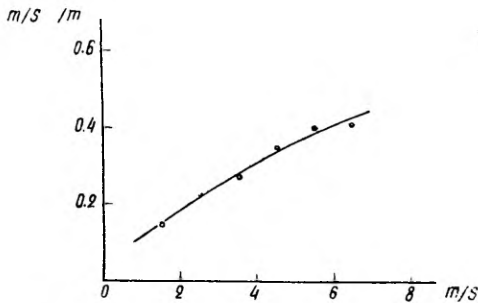
Tuule kiiruse gradient kihis 0.25—8.00 m

Kellaaeg	1.00	4.00	5.30	7.00	8.30	10.00	11.30
Keskmine	0.27	0.22	0.20	0.24	0.26	0.26	0.27
Nõrk tuul	0.28	0.23	0.11	0.14	0.12	0.17	0.18
Tugev tuul	0.32	0.37	0.38	0.36	0.33	0.31	0.34

Kellaaeg	13.00	14.30	16.00	17.30	19.00	20.30	22.00
Keskmine	0.30	0.31	0.26	0.30	0.22	0.22	0.23
Nõrk tuul	0.15	0.14	0.10	0.15	0.18	0.19	0.21
Tugev tuul	0.42	0.41	0.37	0.39	0.28	0.27	0.30

nevad öösel üldiselt umbes 2 korda suuremad gradiendid kui sama kiiruse puhul päeval. Viimane asjaolu on seletatav nõrga tuule puhul öösel esinenud tugeva inversiooniga, mis avaldab mõju tuule profiili iseärasustele. Gradiendi seost tuule kiirusega näitab kõikide andmete keskmiste põhjal koostatud korrelatsiooni graafik (joon. 4): gradient sõltub peaaegu lineaarselt kiirusest.



Joon. 4. Tuule kiiruse gradiendi sõltuvus tuule kiirusest.

Nagu vaatlusmaterjali lähem vaatlemine näitab, sõltub tuule kiiruse gradient ka stratifikatsioonist. Labiilse stratifikatsiooni puhul tasandab õhu hästi arenenud turbulents vahetus tuule kiiruse erinevusi vertikaalses suunas. Tuule kiiruse gradiendid on ühe ja sama kiiruse puhul labiilse kihistuse korral väiksemad kui stabiilsema olukorra puhul.

**2. Tuule kiiruse profiili iseärasusi erineva stratifikatsiooni puhul.** Meteoroloogiliste elementide profiil maalähedases õhukihis sõltub ühelt poolt vabas atmosfääris toimuvatest füüsikalistest protsessidest, teiselt poolt aga maapinna mõjust. Oluliseks teguriks profiili kujunemisel on turbulentne segunemine. Turbulentsi dünaamiline tegur sõltub tuule kiirusest vabas atmosfääris ning konaruse parameetrist. Termiline tegur sõltub temperatuuri vertikaalsest jaotusest: labiilne stratifikatsioon soodustab, stabiilne aga takistab kiiruse vertikaalset pulsatsiooni. Indiferentse stratifikatsiooni puhul sõltub turbulents ainult dünaamilistest teguritest. Sel juhul on turbulentse liikumise mehhanism maalähedases õhukihis analoogiline sellele aerodünaamilistes torudes. Seepärast on võimalik rakendada poolempiirilist turbulentsuse teooriat ka protsessidele maalähedases õhukihis indiferentse kihistuse puhul.

Vastavalt sellele teorialele võib väita, et tuule kiirus suureneb kõrgusega võrdeliselt kõrguse logaritmiga (nn. logaritmiline seadus) Seost iseloomustab valem

$$\frac{u - u_2}{u_1 - u_2} = \frac{\log z - \log z_2}{\log z_1 - \log z_2}, \quad (1)$$

kus  $u$ ,  $u_1$ ,  $u_2$  on tuule kiirused kõrgustel  $z$ ,  $z_1$ ,  $z_2$ .

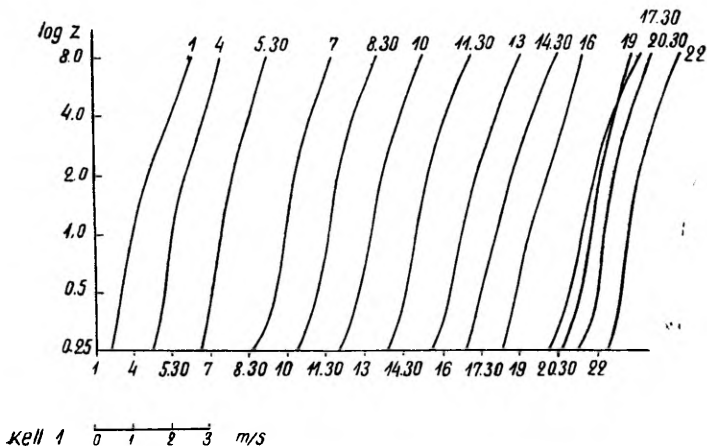
Kui kõrguseks  $z_2$  võtta konaruse parameeter  $z_0$ , s. o. kõrgus, kus õhu korrapärane edasiliikumine muutub nulliks, siis on  $u_2 = 0$ . Sel korral on

$$u = u_1 \frac{\log z - \log z_0}{\log z_1 - \log z_0}. \quad (2)$$

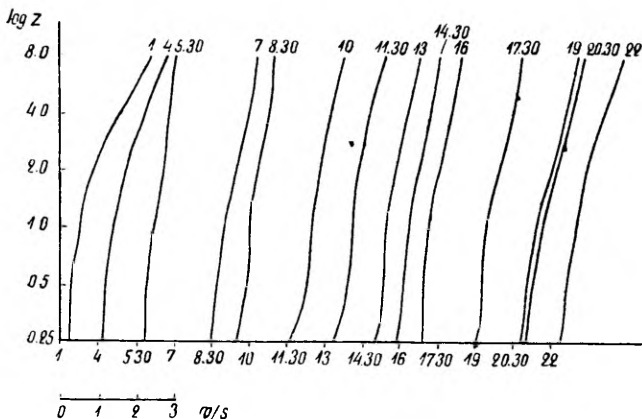
Tuule kiiruse profiil poollogaritmilises koordinaadistikus (horisontaaltelg — tuule kiirus, vertikaaltelg — kõrguse logaritm) on sirgjoon. Olgu siinkohal tähendatud, et seoses maapinna lähedal esinevate temperatuuri suurte vertikaalsete gradientidega kaotavad vabas atmosfääris kehtivad tasakaalutingimused oma mõtte maalähedases õhukihis. Viimases on indiferentse stratifikatsiooni puhul temperatuuri vertikaalne gradient võrdne nulliga, seega esineb maalähedases õhukihis sel juhul isothermia. Temperatuuri languse puhul kõrgusega esineb labiilne, temperatuuri tõusmise puhul aga stabiilne stratifikatsioon.

Looduses esineb suhteliselt harva indiferentne stratifikatsioon, mis maalähedases kihis tähendab isothermiat. Soojal aastaajal esineb öösel enamasti inversioon, päeval aga labiilne stratifikatsioon. Seega kujutab tuule kiiruse profiil sirgjoont vaid üleminekuajadel öisest olukorrast päevasele ja vastupidi, mil valitseb lühikest aega isothermiale lähedane temperatuuri jaotumus kõrgusega.

Joonisel 5 on esitatud tuule kiiruse profiilid poollogaritmilistes koordinaatides kõikide päevade keskmiste andmete põhjal, joonistel 6 ja 7 aga vastavalt nõrga ja tugeva tuulega päevadel



Joon. 5. Tuule kiiruse profiilid (keskmised andmed).

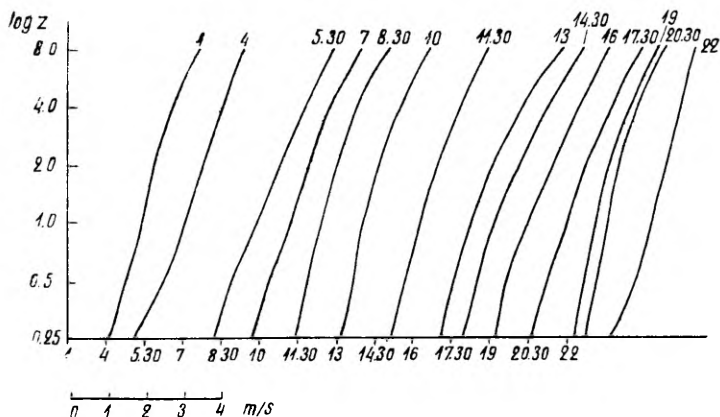


Joon. 6. Tuule kiiruse profiilid nõrga tuulega päevadel.

saadud andmeil. Juba graafikute pealiskaudne vaatlemine näitab, et tuule kiirus muutub tugeva tuule puhul tunduvalt rohkem kui nõrga tuule puhul. Võrreldes üksikute momentide profiilide iseärasusi, võib tähele panna, et profiil kujutab hommikuse isothermia ajal, kell 5.30 (esines tõepoolest terves kihis 0.25 — 8 m isothermia) ning õhtul kella 17.30 ja 20.30 vahel (isothermiline olukord ei ole hästi välja kujunenud) enam-vähem sirgjoont, see tähendab aga, et tuule kiirus suureneb võrdeliselt kõrguse logaritmillega.

Tuule kiiruse sirgjooneline profiil tuleb esile ka üksikutel momentidel hästi väljakujunenud isothermia puhul.

Temperatuuri inversiooni puhul, mis oli hästi välja arenenud



Joon. 7 Tuule kiiruse profiilid tugeva tuulega päevadel.

nõrga tuulega öödel (temperatuuri tõus 0.25 ja 8.00 m vahel keskmiselt  $3^\circ$ ), ei muutu tuule kiirus vastavalt logaritmilisele seadusele. Umbes 1 m kõrguseni kasvab kiirus küll ligikaudu võrdelisel kõrguse logaritmiga, sealt alates on aga kiiruse suurenemine intensiivsem, kui see oleks pidanud olema logaritmilise seaduse järgi. Seega on gradient alates 1 meetrist suhteliselt suur ja tema vähenemine kõrgenemisel on stabiilse stratifikatsiooni puhul nõrgalt arenenud turbulentsi tõttu aeglane. Tuule kiiruse profiil moodustab mainitud põhjustel inversiooni puhul abstsissitelje suhtes nõrgusa kõvera (näit. profiilid kell 22, 1 ja 4 nõrga tuule puhul)

Päeval on nõrga tuule ja labiilse stratifikatsiooni puhul turbulentne vahetus intensiivne kõikides õhukihtides, välja arvatud vahetult maapinna lähedal olev kiht. Selle tagajärjel esineb sel juhul suur tuule kiiruse gradient alumises õhukihis ning väheneb kiiresti kõrgusega turbulentsi suurenedes. Tuule profiil on päeval nõrga tuule puhul oma alumises osas abstsissitelje suhtes vähesel määral kumer joon.

Tugeva tuule puhul öösel inversiooni praktiliselt ei esinenud, stratifikatsioon oli kogu päeva jooksul indiferentsele lähedal, kõverad on kogu päeva jooksul enam-vähem ühesugused, esinevad üldiselt suured vertikaalsed gradiendid.

Üksikute profiilide erinevused ei ole üldiselt väga suured, oma iseärasuste poolest paistab ainult silma inversiooni ajal esinev omapärane kõver suurte vertikaalsete gradientidega, eriti oma ülemises osas. Varem oli näidatud, et tuule kiiruse gradient sõltub suurel määral tuule kiirusest. Käesoleval juhul ei saa aga suuri gradientte põhjendada tuule kiiruse mõjuga, sest viimane on öösel, eriti inversiooni ajal, väike. Seepärast on püütud profiilide iseärasuste põhjusi otsida stratifikatsioonis.

Temperatuuri stratifikatsiooni iseloomustamiseks on kasutatud suurust  $ri = \frac{\Delta t}{u_1^2}$ , kus  $\Delta t$  on temperatuuri vahe 2.0 ja 0.5 m kõrgusel,  $u_1$  — tuule kiirus 1 m kõrgusel.

Et tuule kiiruse otsest mõju gradiendile elimineerida, on edasi käsitletud tuule kiiruse suhtelist muutust kõrgusega, s. o. suhet  $\frac{u_z}{u_1}$ , kus  $u_1$  on tuule kiirus 1 m kõrgusel,  $u_z$  aga kiirus mingisugusel kõrgusel  $z$  (meil 0.25, 0.50, 1.00, 2.00, 4.00 ja 8.00 m). Tabelis 5 on

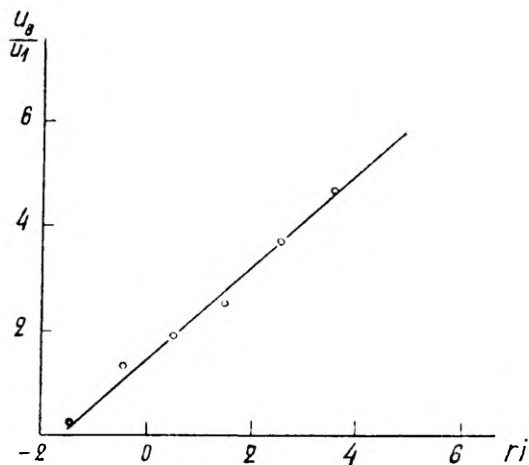
Tabel 5

Suhe  $\frac{u_z}{u_1}$

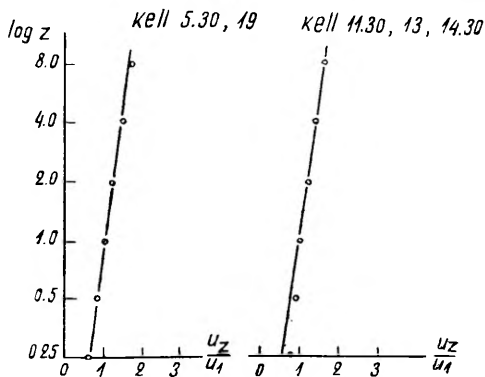
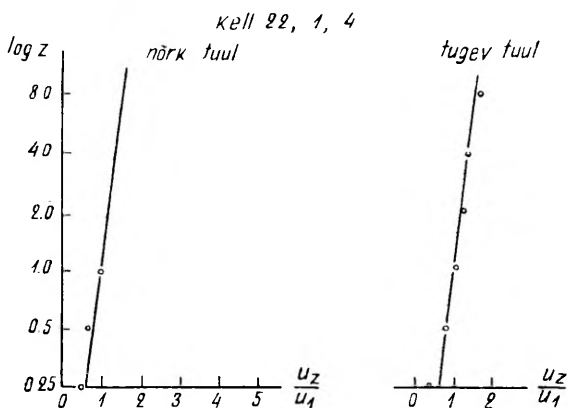
	Kõrgus (m)					
	0.25	0.50	1	2	4	8
Kell 22, 1, 4						
Nõrk tuul	0.4	0.6	1.0	1.7	2.9	4.3
Tugev tuul	0.4	0.8	1.0	1.2	1.4	1.7
Kell 5.30, 19.00						
Nõrk tuul	0.6	0.7	1.0	1.3	1.6	1.8
Tugev tuul	0.7	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
Kell 11.30, 13.00, 14.30						
Nõrk tuul	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6
Tugev tuul	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.7

antud  $\frac{u_z}{u_1}$  keskmised väärtused öösel, päeval, hommikul ja öhtul nõrga ja tugeva tuule puhul. Kihis 1—8 m on tuule kiiruse suhteline muutus  $\frac{u_8}{u_1}$ . Vaatlusandmetest selgub, et suhe  $\frac{u_8}{u_1}$  sõltub stratifikatsioonist: mida stabiilsem on kihistus, seda suurem on  $\frac{u_8}{u_1}$ . Seda kinnitab kõikide vaatlusandmete keskmiste põhjal koostatud joonis 8, mis iseloomustab tuule kiiruse suhtelise muutuse sõltuvust arvust  $ri = \frac{\Delta t}{u_1^2}$ .

Joonestades suhte  $\frac{u_z}{u_1}$  profiile poollogaritmilises koordinaadistikus (abstsisstelg — suhe  $\frac{u_z}{u_1}$ , ordinaattelg — kõrguse logaritm) võib tähele panna, et nendel tulevad tõepoolest selgesti esile stratifikatsiooni tüüpidega seoses olevad iseärasused (joon. 9) Öö tarvis on graafik koostatud eraldi nõrga ja tugeva tuule jaoks. Päeval



Joon. 8. Suhte  $\frac{u_8}{u_1}$  sõltuvus arvust  $r_i$ .



Joon. 9. Tuule kiiruse suhteline muutus kõrgusega.

ning üleminekuagadel on nende kohta antud ühine graafik, sest erinevused olid väikesed. Tuule kiiruse muutust logaritmilise seaduse järgi iseloomustab joonisel antud sirge, punktid aga näitavad kiiruse tegelikku muutust vaatlusandmete põhjal. Nagu selgub, on kiirus nõrga tuule ja inversiooni puhul kuni 1 meetrini veidi väiksem kui indiferentse kihistuse puhul, 1 meetrist alates kasvab aga ta kiiresti kõrgenemisel. Tugeva tuule puhul oli stratifikatsioon öösel lähedal indiferentsele ning suhte  $\frac{u_z}{u_1}$  tegelik profiil langeb peaaegu ühte mainitud sirgega. Hommikul ja õhtul muutub suhteline kiirus kõrgusega logaritmilise seaduse järgi. Ka päevastes tingimustes ei esine nii nõrga kui ka tugeva tuule puhul nime-tamisvääraseid kõrvalekaldeid logaritmilisest seadusest. Labiilsust iseloomustava suuruse ri absoluutne väärtus on ka päeval nõrga tuule puhul ligi 5 korda väiksem ri absoluutsest väärtusest inver-siooni puhul.

Analoogilistele tulemustele on tulnud O. Sutton (1958).

### III. MÖNINGATE TUULE PROFIILI ISELOOMUSTAVATE VALEMITE RAKENDATAVUSE KONTROLL TARTU KLIIMA TINGIMUSTES

Nagu eespool öeldud, muutub indiferentse stratifikatsiooni puhul kiirus kõrgenemisel vastavalt poolempiirilisele turbulentsuse teooriale võrdeliselt kõrguse logaritmiga.

Labiilse ja stabiilse stratifikatsiooni puhul aga erineb, nagu seda näitavad joonised, tuule profiil logaritmilisest. Mitmed autorid on tuletanud valemeid tuule profiili iseloomustamiseks ükskõik millistel tingimustel, arvestades seejuures mitmeti turbulentsi dünaamilist ja termilist tegurit. Kõige kasutatavamad on Laihtmani ja Budõko valemid. Nende, samuti ka logaritmilise seaduse rakendatavust Tartu kliima tingimustes on kontrollitud ka käesolevas töös. Tuule profiili iseloomustav Laihtmani valem, nõnda nimetatud «Laihtmani üldistatud astmeline seadus» on

$$u = u_1 \frac{z^\varepsilon - z_0^\varepsilon}{z_1^\varepsilon - z_0^\varepsilon}, \quad (3)$$

kus  $\varepsilon$  on stratifikatsioonist sõltuv suurus. Labiilse stratifikatsiooni puhul on  $-0.5 < \varepsilon < 0$ , stabiilse stratifikatsiooni puhul  $0 < \varepsilon < 0.5$  ja indiferentse stratifikatsiooni puhul  $\varepsilon = 0$ .

Indiferentse stratifikatsiooni puhul taandub valem logaritmi-liseks (2).

Laihtmani valem iseloomustab suhteliselt hästi profiili peen-susi, kuid ta eeldab vaatlusandmete küllaldast täpsust. Selle tõst-miseks soovitatakse vaatlusi teha mitte kahel, nagu seda eeldab valem, vaid mitmel kõrgusel ning karakteristikute määramisel

arvestada mitmete vaatlusseeriade keskmisi andmeid. Seejuures kasutatakse tavaliselt graafilist meetodit [Gandin, Laihtman, 1955].

Valem (3) kirjutatakse kujul

$$u = \frac{\varepsilon u_1}{1 - \left(\frac{z_0}{z_1}\right)^\varepsilon} X + u, \quad (4)$$

kus

$$X(z, \varepsilon) = \frac{\left(\frac{z_1}{z}\right)^\varepsilon - 1}{\varepsilon}$$

Kindla  $\varepsilon$  puhul on  $X$  ainult  $z$  funktsioon.

Graafikule kantud punktid abstsissidega  $X$  ja ordinaatidega  $u$  moodustavad õigesti valitud  $\varepsilon$  puhul sirgjoone. Seda meetodit võib kasutada  $\varepsilon$  ja  $z_0$  leidmiseks ning edasi  $u$  määramiseks mingil kõrgusel  $z$  ühel kõrgusel  $z_1$  mõõdetud kiiruse järgi ( $u$  arvutatakse (3) järgi või võetakse graafikult)

Käesolevas on kasutatud Laihtmani meetodit  $\varepsilon$  ja  $z_0$  määramiseks 10-päevaste keskmiste tuule kiiruste põhjal 6-l kõrgusel.

Kella 22, 1 ja 4 ajal teostatud vaatluste andmeil on saadud üks ja sama  $\varepsilon$  väärtus 0.30. Seepärast on käesolevas toodud tuule kiiruste muutuste iseloomustamiseks kõrgenemisel stabiilse stratifikatsiooni puhul vaid üks ühine kella 22, 1 ja 4 keskmiste andmete põhjal koostatud graafik. Tuule režiimi indiferentse stratifikatsiooni puhul iseloomustavad kella 5.30 ja 19.00 ( $\varepsilon=0.05$ ) ning labiilse stratifikatsiooni puhul — kella 11.30, 13, 14.30 ( $\varepsilon=-0.05$ ) keskmiste kiiruste põhjal valmistatud graafikud (joon. 10, 11). Konaruse parameeter  $z_0$  oli kõikidel juhtudel ligi 3 cm.

Peale selle on kasutatud sama meetodit profiili analüüsimiseks tuule erineva kiirusega päevadel. Nõrga tuule puhul oli öösel  $\varepsilon=0.30$ , päeval —0.10, seega olukord analoogiline sellele, mida annavad perioodi keskmised andmed (päeval vaid väike erinevus).

Tugeva tuule puhul oli stratifikatsioon päev läbi indiferentsele lähedal ( $\varepsilon=0.05$ ) ning sel juhul iseloomustavad olukorda kella 5.30 ja 19.00 keskmiste andmete põhjal saadud graafikud.

Budõko soovitab järgmist valemit tuule kiiruse määramiseks:

$$u = u_1 + \frac{v_*}{\kappa m} \ln \frac{z}{z_1} \quad (5)$$

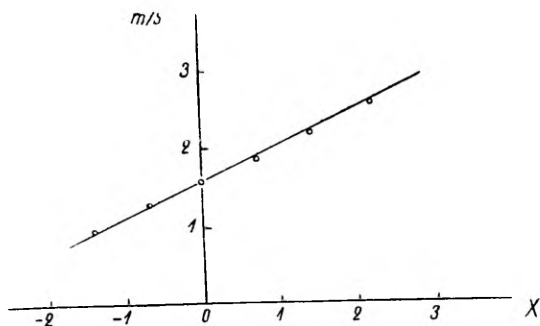
Selles on  $v_*$  — dünaamiline kiirus,

$\kappa$  — parameeter, võrdub ligikaudu 0.38,

$m$  — stratifikatsiooni iseloomustav parameeter: stabiilse stratifikatsiooni puhul  $0.2 < m < 1$ , labiilse stratifikatsiooni puhul  $1 < m < 4$ , indiferentse stratifikatsiooni puhul  $m=1$

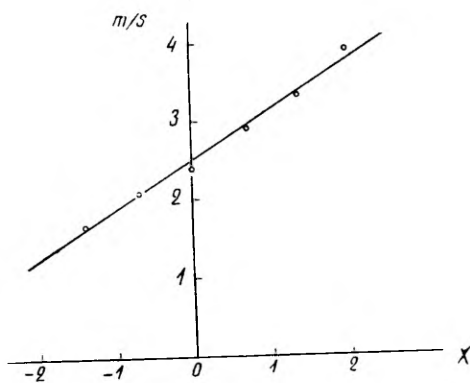
$u$  ja  $u_1$  — tuule kiirused kõrgusel  $z$  ja  $z_1$ .

Kell 5.30 ja 19  
 $\epsilon = 0.05$

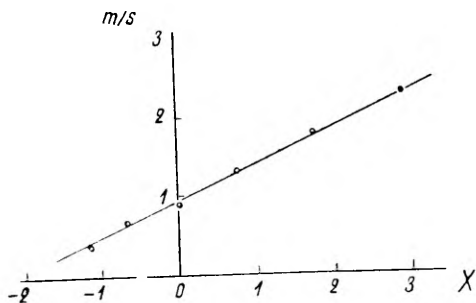


Joon. 10. Tuule kiiruse profiil Laihtmani skeemi järgi.

Kell 11.30, 13, 14.30  
 $\epsilon = -0.05$



Kell 22, 1, 4  
 $\epsilon = 0.30$



Joon. 11. Tuule kiiruse profiilid Laihtmani skeemi järgi.

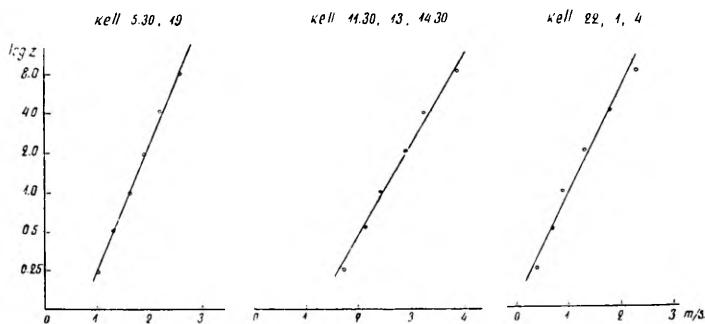
Budōko valemi järgi sõltub tuule kiirus lineaarselt  $\ln \frac{z}{z_1}$ -st. Ka Budōko soovib suurema täpsuse saavutamiseks lähtuda mitmel kõrgusel mõõdetud tuule kiiruse keskmistest andmetest, kasutades seejuures graafilist meetodit. Graafikule kantakse punktid koordinaatidega  $\ln z$  ja  $u$  ning määratakse punktidest läbitõmmatud sirge tõus  $tg \alpha = \frac{v_*^*}{\kappa m}$  [Gandin Laihtman, 1955].

Rakendades Budōko meetodit, saame järgmised  $tg \alpha$  väärtused:

kell 22, 1. 4	0.54,
„ 5.30, 19	0.45,
„ 11.30, 13, 14.30	0.63. (Joon. 12)

Tuule kiiruste määramiseks erinevatel kõrgustel kasutame valemit (5), asetades  $\frac{v_*^*}{\kappa m}$  asemele leitud  $tg \alpha$  väärtused.

Saadud valemite praktiline väärtus seisneb peamiselt selles, et nende abil on võimalik taandada tuule kiiruse andmeid ühelt kõrguselt teisele. Vajadus selle järele võib tekkida, kui on vaja iseloo-



Joon. 12. Tuule kiiruse profiilid Budōko skeemi järgi

mustada olukorda maapinna lähedal, kasutada on aga meteoroloogiajaamades umbes 12 m kõrgusel mõõdetud andmed tuule kiiruse kohta. Vastupidi, üldklimatoloogiliste probleemide lahendamisel on tihti vaja andmeid tuule kohta suuremal kõrgusel. Kui viimased puuduvad, võib toimetada vaatlusi näiteks 2 m kõrgusel, mis on kergesti teostatav ka ekspeditsioonidel, ning tuule kiirust ekstrapoleerida suurematele kõrgustele.

Käesolevas on proovitud 2 m kõrgusel toimetatud vaatluste põhjal määrata tuule kiirused teistel kõrgustel. Selleks on kasutatud kuuel kõrgusel mõõdetud tuule kiiruste järgi saadud Laihtmani ja Budōko valemiteid, samuti on kontrollitud logaritmilise sea-

duse rakendatavust Tartu kliima tingimustes. Konaruse parameetrik on võetud  $z_0=3$  cm. Tabelis 6 on esitatud valemite abil arvatud tuule kiiruste kõrvalekalded tegelikult esinenud tuule kiirustest. Tabelis on  $u_m$  — mõõdetud tuule kiirus,  $u_L$ ,  $u_B$ ,  $u_{log}$  — vastavalt Laihtmani ja Budõko ning logaritmilise valemi järgi arvatud tuule kiirused.

Tabel 6

Arvatud tuule kiiruste kõrvalekalded tegelikult esinenud kiirustest

Kellaeg	Stratifikatsioon	$u_{arvut.}$ $u_{mõöd.}$	Kõrgus (m)					
			0.25	0.50	1.00	2.00	4.00	8.00
22, 1, 4	stabiilne	$u_m - u_L$	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0
		$u_m - u_B$	0.2	0.1	0.0	—	0.1	0.3
		$u_m - u_{log}$	-0.2	-0.2	-0.2	—	0.3	0.6
5.30, 19	indiferentne	$u_m - u_L$	0.1	0.0	0.0	—	0.0	0.1
		$u_m - u_B$	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.1
		$u_m - u_{log}$	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.1
11.30, 13, 14.30	labiilne	$u_m - u_L$	0.1	0.1	-0.1	—	0.0	0.1
		$u_m - u_B$	0.1	0.1	-0.1	—	0.0	0.1
		$u_m - u_{log}$	0.2	0.1	0.0	—	0.2	0.0
ööpäevane keskmine		$u_m - u_{log}$	0.0	0.1	-0.1	—	0.0	0.0
		$u_m - u_B$	0.1	0.1	-0.1	—	0.0	0.1
		$u_m - u_{log}$	0.0	0.0	-0.1	—	0.0	0.2

Laihtmani valemi kasutamisel saame vea maksimaalse väärtuse  $\pm 0,1$ , mis langeb mõõtmisvea piiridesse. Budõko valemi puhul on päeval ning üleminekutundidel öisest olukorrast päevasele ja vastupidi (labiilne ja indiferentne stratifikatsioon) viga sama, öösel aga (stabiilne stratifikatsioon) on viga suurem, nimelt kuni 0.3. Järeldusele, et Budõko valem ei sobi hästi inversioonitingimustes, on tulnud ka teised autorid [Gandin, Laihtman, 1955].

Logaritmilise seaduse rakendamine annab häid tulemusi indierentse stratifikatsiooni puhul (viga kuni  $\pm 0.1$ ), ka labiilse stratifikatsiooni puhul on viga küllalt väike (maksimaalselt  $\pm 0.2$ ). Suurem kõrvalekalle tekib jällegi inversiooni puhul, vea absoluutne väärtus on maksimaalselt 0.6.

Suuremad kõrvalekalded, mis tekivad Budõko valemi ja logaritmilise seaduse rakendamisel kella 22, 1 ja 4 ajal saadud andmetele, eriti kõrgustel 4 ja 8 m, on seletatavad sellega, et valemid ei arvesta küllaldaselt tuule kiiruse profiili omapära suurematel kõrgustel inversioonitingimustes. Seevastu iseloomustab Laihtmani valem hästi profiili ükskõik missuguse stratifikatsiooni puhul.

Seega võib Laihtmani valemit pidada siinkohal analüüsitud valemest kõige täpsemaks. Kuna aga arvutused valemi kasutamisel on küllalt keerukad ja aegaviitvad, võib labiilse, eriti aga indiferentse stratifikatsiooni tingimustes soovitada ka Budōko ja logaritmiliste valemite kui lihtsamate rakendamist.

Tabelis 6 on allpool antud arvutatud ööpäevaste keskmiste kiiruste kõrvalekalded mõõdetud kiirustest. Seejuures on kasutatud indiferentse stratifikatsiooni jaoks saadud valemeid. Nagu arvud näitavad, annavad sel juhul kõik valemid häid tulemusi. Praktiliseks otstarbeks võib ööpäevaste keskmiste määramiseks soovitada logaritmilist valemit kui kõige lihtsamat.

Käesolevas töös on kontrollitud valemite rakendatavust teatava perioodi (10 päeva) keskmiste väärtuste määramisel. Tuule kiiruste määramisel üksikutel vaatlusmomentidel tekkinud viga on suurem. Kuid ka sel juhul sobivad valemid tuule kiiruste hindamiseks.

Et tuule profiili iseärasuste selgitamiseks on kasutatud selgetel ja keskmise pilvitusega päevadel representatiivsetes tingimustes teostatud mõõtmiste andmeid, võib oletada, et samasugused seaduspärasused tulevad esile analoogilise ilmastiku puhul Kagu-Eesti kliimatingimustes üldse.

Nagu arvatakse [Gandin, Laihtman, 1955; Ogneva, 1955] esinevad samad seaduspärasused tuule profiilis umbes 30 m kõrguseni, seega on valemid rakendatavad selles kihis.

### Kokkuvõte

Tuule kiiruse profiili uurimisel Tartu ümbrusest saadud andmeil on jõutud järgmistele järeldustele:

1. Tuule kiiruse profiilid muutuvad ööpäeva jooksul, samuti tulevad esile profiilide iseärasused erineva ilmastiku puhul, sõltudes peamiselt turbulentsi dünaamilistest ning termilistest teguritest.

2. Maalähedase õhukihi iseärasus — suured tuule kiiruse gradiendid — tulevad käesoleva materjali põhjal hästi esile. Gradiendid vähenevad kiiresti kõrgenemisel.

3. Tuule profiil läheneb indiferentse stratifikatsiooni puhul logaritmilisele, labiilse ning stabiilse stratifikatsiooni puhul erineb aga tunduvalt sellest. Eriti suured kõrvalekalded esinevad inversiooni puhul.

4. Tuule profiili iseloomustamiseks stratifikatsiooni kõikidel tüüpidel sobib hästi Laihtmani valem, labiilse ja indiferentse stratifikatsiooni puhul ka Budōko ning logaritmiline valem. Valemeid võib vastavatel juhtudel eduga kasutada tuule kiiruse taandamiseks ühelt kõrguselt teisele.

5. Kuna vaatlused on toimetatud enam-vähem representatiivsetes tingimustes, võib arvata, et samad seaduspärasused esinevad analoogilistes tingimustes Kagu-Eestis üldse.

Käesolevas on tehtud järeldused suhteliselt lühikesel perioodil toimetatud gradientvaatluste põhjal. Küsimus vajab kontrollimist ning edaspidist uurimist Tartu ümbruse ning Kagu-Eesti tingimustes üldse.

#### KIRJANDUS

1. Г ан д и н, Л. С., Л ай х т м а н, Д. Л., 1955. Основы динамической метеорологии. Л.
2. О г н е в а, Т. А., 1955. Некоторые особенности теплового баланса деятельной поверхности. Л.
3. С е т т о н, О. Г., 1958. Микрометеорология. Л.

### О ПРОФИЛЕ ВЕТРА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА ПО ДАННЫМ ОКРЕСТНОСТИ ТАРТУ

Е. Лийдемаа

Резюме

Исследование профиля ветра по данным градиентных наблюдений в окрестности Тарту приводит к следующему:

1. Профиль ветра меняется в течение суток. Отмечаются некоторые особенности профиля при различных погодных условиях, зависящие в основном от динамического и термического фактора турбулентности.

2. Наблюдаются большие градиенты скорости ветра в приземном слое воздуха. Градиенты быстро уменьшаются с высотой.

3. При равновесных условиях профиль ветра близок к логарифмическому, при устойчивой и неустойчивой стратификации он значительно отклоняется от него. Особенно велики отклонения при инверсии.

4. Особенности профиля при различной стратификации хорошо описывает формула Лайхтмана. При безразличной и неустойчивой стратификации применимы также формула Будыко и логарифмический закон. В данных случаях можно с успехом пользоваться названными формулами для приведения скорости ветра от одной высоты к другой.

5. Так как измерения производились в более или менее репрезентативных условиях, можно предполагать, что аналогичные закономерности наблюдаются в юго-восточной части Эстонии вообще.

Настоящие выводы сделаны на основании сравнительно короткого ряда градиентных наблюдений. Желательно проверить приведенные результаты как в окрестности Тарту, так и в условиях юго-восточной Эстонии вообще.

# ON WIND PROFILE IN THE LOWEST LAYERS OF THE ATMOSPHERE ON THE BASIS OF DATA FROM THE SURROUNDINGS OF TARTU

H. Liidema

## Summary

The profile of wind velocity in the surroundings of Tartu has been studied. The following conclusions have been arrived at:

1. The profiles of wind velocities vary within the day and with changes in the weather, depending mainly on the dynamic and thermal factors of the turbulence.

2. High gradients of wind velocity which constitute a peculiar feature of the lowest layers of the air are clearly revealed on the basis of the collected material. The gradients show a rapid decrease with an increase of the altitude.

3. In the case of indifferent stratification, wind profile is nearly logarithmic, in cases of labile and stable stratifications, however, it is greatly different. Variations are especially marked in the case of inversion.

4. Wind profile of all types of stratification is best characterized by the Laihtmann formula. In cases of labile and indifferent stratification, also the Budyko and the logarithmic formulae can be applied. The formulae can also be successfully used for the reduction of wind velocity from one altitude to another.

5. The observations having been carried out in more or less representative conditions, we may believe that the same regularities are valid in similar conditions all over the southeastern part of Estonia

The conclusions presented in this paper have been drawn on the basis of gradient observations covering a relatively short period of time. The problem requires further elaboration and investigation in the conditions of the vicinity of Tartu and in the whole of southeastern Estonia.