

3. UV-KIIRGUS JA OSOON ATMOSFÄÄRIS

3.1. UV-kiirguse ja osooni vastasmõju

Osoon tekib UV-kiirguse mõjul ja paikneb põhiliselt kõrgustel **15–30 km**. Osooni molekuli tekkeprotsess on kaheastmeline. Esmalt laguneb osa hapniku molekule **UV-kvantide** toimel:



selles valemis väljendab korrutis $h\nu$ ühe UV-kvandi energiat, Plancki konstant:

$$h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J s.}$$

Märkus. Kiirguse ringsagedus, $\omega = 2\pi\nu$, sellisel juhul Plancki nn 'nurkkonstant', \hbar :

$$h\nu = \hbar\omega, \text{ kus } \hbar = \frac{6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{2\pi} = 1.054 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}.$$

Et O_2 -molekuli lagunemine toimuks, peab kvandi energia $h\nu$ olema piisavalt suur. Suurema energia tagab suurem võnkesagedus ν , seega väiksem lainepikkus λ . Maksimaalne lainepikkus, mille korral kvant veel suudab lõhkuda hapnikuaatomi, on ligikaudu võrdne

$$\lambda \approx 240 \text{ nm.}$$

Hapnikumolekuli lagunemisel tekkinud üksikud hapniku aatomid liituvad hapniku kaheaatomilise molekuliga moodustades **osooni 3-aatomilise molekuli**:



Võrreldes atomaarse hapniku või kaheaatomilise hapniku molekuliga on tekkinud **kolmeaatomiline osooni molekul** hoopis võimekam neelama mööduvaid kvante, sealhulgas Päikese UV-kiirgust, moodustades osooni nn **planetaarse kaitsekihi** UV eest. See on osooni tähtsaim positiivne omadus looduses.

Kuid osooni lagundavad *freoonid* – **Cl** ja **F**, ühendid, mis **aurustuvad/veelduvad** rõhu muutudes kergesti toatemperatuuril (külmutuskappide, konditsioneeride, aerosoolpakendite, survestatud kaablite jne täitevedelikud). Seega lõhuvad freoonid (täpsemalt, nende lagukomponendid) **15-30 km** kõrgusel (stratosfääris) asuvat osoonist koosnevat planetaarset kaitsekihti.

Mis juhtub, kui stratosfäärne osoonikiht nõrgeneb? Siis jõuab UV-kiirgus aluspinnale lähemale ja võib kiirguslikult kahjustada nii taimi kui loomi. Samuti vallandab atmosfääri alumistesse kihtidesse jõudnud UV-kiirgus seal osooni tekke.

Kas aluspinna lähedal olev osoon mõjub kokkupuutes taimede, loomade ja inimestega kasulikult või kahjulikult? Sõltub osooni kogusest. Väikestes doosides mõjub osoon **desinfitseerivalt**, näiteks joogi- ja basseinivett desinfitseeritakse osooniga.

Legend. On arvatud, et kopsuhaiglaid tuleks tuberkuloosi raviks ümbritseda männimetsadega just osooni pärast. Sellesse arvamusse tuleks tänapäeval suhtuda pigem skeptiliselt (*Ozone from pine trees? Urban myth!*). Kuid okaspuud eritavad terpeene ($\text{C}_{10}\text{H}_{16}$). Terpeenidel on bakteritsiidsed omadused, taimed sünteesivadki neid kaitseks ohtlike mikroorganismide eest. Ilmselt on see terpeenide tervistav mõju, mida varem osoonile omistati. Terpeene oli enne kõrgtundliku kromatograafia ja mass-spektromeetria levikut pea võimatu õhus määrata (*kromatograafia* on üldmõiste mitmesuguste laboratoorsete füüsikalise-keemiliste meetodite kohta, mida kasutatakse uuritavate ainete segu komponentide määramiseks). Samas peavad kopsuarstid (Tanel Laisaar) looduslike ainete kontsentratsioone liiga väikesteks tõhusaks raviks.

NB! Suurtes kogustes mõjub osoon mürgina, paljud taimekahjustused (pruunid laigud kartulilehtedel) võivad olla põhjustatud osoonist.

Lisaks kiirguslikule tekkimisele O₂ molekuli lagunemisel tekib osooni ka fotokeemilistes reaktsioonides autokütuse mittetäieliku põlemise saadustest (CO, NO, OH-rühm jne). Linnade fotokeemilise sudu üheks koostisaineks ongi osoon.

Õhusamba osoonikihist üle **90%** paikneb stratosfääris ja ligi **10%** troposfääris. **NB!** Hinnanguliselt oli enne tööstusrevolutsiooni algust (ca 1750) troposfääris ainult alla **5%** osooni.

UV-kiirguse bioloogiline toime

Elektromagnetilist kiirgust lainepikkusega **10–400 nm** nimetatakse **ultraviolettkiirguseks**, lühidalt UV-kiirguseks. Omab väga tugevat bioloogilist toimet, mis on seletatav fotokeemiliste protsessidega. Bioloogiline toime sõltub UV-kiirguse lainepikkusest. Päikese kiirgusega ei jõua aluspinnani lühem kui **200 nm** kiirgus, seega on looduslik UV-kiirguse lainepikkuste vahemik **200–400 nm**, see jagatakse kolmeks alampiirkonnaks – **A, B, C** (joon. 3.1).



Joon. 3.1. Elektromagnetkiirguse lainepikkuste skaala.

Märkus: inimsilma nägemispiirkonnad:

ca 400–750 nm päevasel nägemisel,

ca 380–660 nm öisel nägemisel,

Selgitame UV-piirkonna, **200–400 nm**, alampiirkondade bioloogilisi toimeid.

UV-A (315–400 nm) –soodustab nahas tumepruuni või musta pigmendi (melaniin, kr *melas* must) moodustumist; osa autoreid väidab, et **UV-A** läbib aknaklaasi, samas siseruumides akna lähedal istudes nahk siiski ei pruunistu ega punetu;

UV-B (280–315 nm) – suurema energiaga kvandid kui **UV-A**-piirkonnas, põhjustab **nahapunetumist** ja **põletusi**, siit nimetus – **erüteemne UV-kiirgus**; stimuleerib organismis **D-vitamiini** moodustumist, mis omakorda väldib rahhiidi ja vähkkasvajate teket; seda kiirgust kasutatakse ka kurgu- ja neelupõletike ning mädanevate haavade raviks (nn *külm kvartskiirgus*); probleemid siiski pordisaalide jt ruumide ereda valgustusega TV ülekannete ajaks – osade lampide spektris on **UV-B**;
erüteemne – punetust tekitav;

UV-C (200–280 nm) – kõige “tugevamate, kalgimate” kvantide piirkond, bakteritsiidne toime (kr k *bakteria* – kepp, sau; lad k *caedere* – tapma); **väga erüteemne; NB!** päiksekiirguse koosseisus see **aluspinnani ei jõua**, kuid kahjustab satelliite ja lennukeid.

Desinfitseerimislambid meditsiinis. Põhiliselt **UV-B**, vähesel määral võimalik **UV-C**.

Kasutatakse haiglaruumide desinfitseerimiseks ja steriilse keskkonna loomiseks, nn kvartslambid. **NB!** tekitavad **konjunktiviiti** – silma sidekesta põletikku. Kui haiglapalatis või operatsiooni- sidumistoas lülitatakse desinfitseerimiseks sisse kvartslamp, tuleb ruumist lahkuda või kanda kaitseprille.

Materjalide (sh puidu, värvkatete) degradeerumine valguse käes. Oluline roll UV-kiirgustel. Kuid värvkatted pleekuvad (osa lakke ka tumeneb) ka siseruumides. Vastavad uuringud on tülilikalt aeganõudvad.

Päikseprillide kvaliteet. Peavad tõkestama UV jõudmise silmani, sest silmaava (pupill) on tumeda prilli taga rohkem avatud ja kaitsetu. Arvatakse, et silmaläätse tuhmumise ja elastsuse vähenemise (**hallkae ehk katarakt**) üheks põhjuseks ongi UV-kiirgus. Katarakti ravi, kuni 1980-ni, seisnes silmaläätse eemaldamises (ilma proteesimiseta) ning seejärel väga paksude prillide kandmises. Praeguses ravis silmalääts asendatakse gabariitidelt väikese (standard **6 mm**) mitteakmodeeruva plastläätsuga. Patsientidel taastub lühemate lainepikkuste, samuti valge värvi nägemine, ilmne võrdlusmoment tekib patsiendil pärast ühe silma opereerimist, maailm pole opereeritud silmaga vaadates enam nii kollakas.

Üledoseerituna on UV kiirgus (päevitumine villideni) kantserogeenne, põhjustab nahavähki. Peiteperiood **10–15 aastat**.

Biodoos ehk MED (Minimaalne Erüteemne Doos) – teatava lainepikkusega kiirgusenergia kogus pinnaühikule, mis on vajalik päevitumata naha kerge nahareaktsiooni tekkimiseks. Kuna praktikas ei olnud, kuni viimaste aastateni, UV-kiirgusenergia mõõtmine harilikult võimalik, hinnati MED-i ajaga, mis kulub punetuse tekkimiseks. Meedikute soovitus – organismi normaalseks talitluseks oleks igapäevaselt vaja saada kogu kehale **ca 1/10 biodoosi** või katmata kehaosadele vastavalt rohkem. Üldistamiseks on see soovitus ligikaudne, sest jätab ebamääraseks nahatüübi. Tumedam nahk ja tumedamad silmad taluvad UV-kiirgust paremini, biodoosile vastab suurem kiirgusenergia. Kuid lõunamaalased vajavad ka rohkem päikesekiirgust. Põhjamaadesse kolinud tumedanahalistel tekib kergemini nii üldvalguse kui UV-kiirguse puudus, samal ajal kui põhjamaade põliselanikel tekib seda vähem. Ekslik on aga arvata, et tumedanahalised võivad piiramatult päikese käes olla. Ka tumedanahalistel on haigusi, mida seostatakse liiga suurte UV-doosidega, näiteks süsteemne haigus *luupus* – ‘hunt’ lade, mille korral indiviidi immuunsussüsteem võimendub ja pöördub organismi enda vastu. Ravi – immuunsussüsteemi nõrgestamine, näiteks hormoonravimi *prednisoloon* abil. Biodoosi energeetilised vasted erinevate nahatüüpide jaoks esitame edaspidi samas peatükis.

3.2. Dobsoni ühik

DU – Dobson Unit, total ozone

See on antud asukohas **atmosfäärisambas** parajasti oleva osooni üldkoguse (tähistus $\sum O_3$ – total ozone) väljendamiseks **osoonikihi nn taandatud paksuse kaudu**:

- 1) osoon (põhimõtteliselt ka mingi teine atmosfääris olev uuritav gaas) taandatakse arvutuslikult mingile standardrõhule, tavaliselt **1013.25 hPa** ja standardtemperatuurile, näiteks **0 °C**,
- 2) saadud osoonikihi paksus väljendatakse **sajandikmillimeetrites, 0.01 mm osoonikiht ongi Dobsoni ühikuks**.

Taandatud osoonikihi paksusega **0.01 mm** vastab **1 Dobsoni ühik (1 DU)**,

1 mm vastab **100 Dobsoni ühikut (100 DU)**,

1 cm vastab **1000 Dobsoni ühikut (1000 DU)**.

USA-s kasutatakse **sajandikmillimeetri** tähisena ka **tuhandiksentimeetrit ehk millisen-timeetrit**, mille lühend oleks **mcm**, kuid kahekordse kümnendkordaja kooskasutamine (*milli* + *sent*) pole soovitatav. Seepärast on USA-s atmosfäärisamba taandatud osoonikihi (või ka mõne muu gaasi) paksuse väljendamisel sentimeetrites kasutusel termin **atmosfääri-**

sentimeeter (**atm cm**). Selle tuhandikosa, **milliatmosfäärisentimeeter (matm cm)** vastabki ühele Dobsoni ühikule.

Klimatoloogilisi andmeid osoonikihi paksuse kohta:

$\sum O_3 = 300 \text{ DU} = 3 \text{ mm} = 0.3 \text{ cm} = 0.3 \text{ atm cm} = 300 \text{ matm cm}$ – planetaarne \approx keskmine osoonikihi paksus, tüüpiline väärtus, kasutatakse päiksekiirguse nõrgenemise arvutustes ja atmosfääri kiirgusmodelites;

min $\sum O_3 < 100 \text{ DU}$ – Antarktikas seasel kevadel, septembri lõpus, oktoobris;

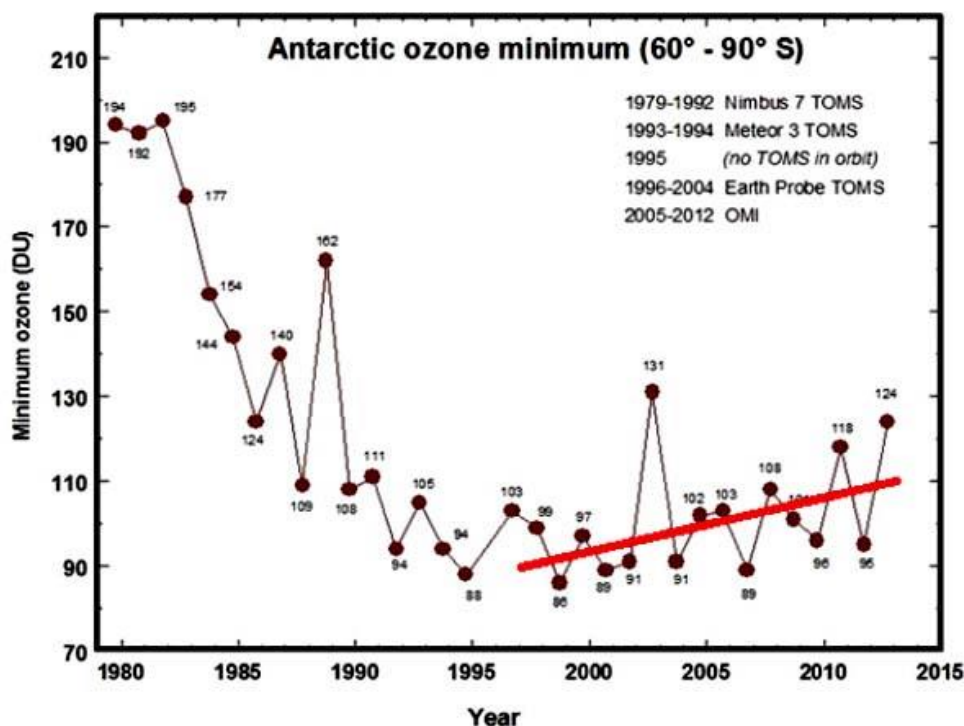
min $\sum O_3 < 200 \text{ DU}$ – troopikas (kuigi osoon ise tekib ekvatoriaalses tsoonis);

max $\sum O_3 > 600 \text{ DU}$ – polaaraladel jaanuaris (absoluutne rekord **675 DU**).

G.M.B. Dobson, 1889–1976, inglise teadlane, esimesi atmosfääri osoonikihi paksuse uurijaid, tegutses Oxfordis, aastatel 1920–1960. Konstrueeris nn '**Dobsoni spektrometri**' mis töötab neljal lainepikkusel, millest kaks asuvad osooni neeldumisribades ja kaks mitte.

3.3. Antarktika osooniauk

Brittide Antarktika ekspeditsioon, reastades erinevate aastate oktoobrikuude mõõtmisi, avastas aastal 1985, et osoonikiht Antarktika kohal on õhenenud (joon. 3.2). Hiljem avastati sama efekt nõrgemal kujul ka Arktika kohal. Osooniauke põhjustavad mitmed fotokeemilised ja katalüütilised protsessid. Osooniauk triivib polaaraladelt madalamate laiuste (ekvaatori) poole. On huvitav märkida, et osoonikihi hõrenemist 1980tel kahtlustasid ka eestlastest Antarktika uurijad-meteoroloogid, füüsikuharidusega **Vello Park (4 talvitumist)** ja **Enn Kaup (2 talvitumist, 10 viibimist)**, kes aga pidasid tulemust aparatuurseks veaks.



http://principia-scientific.org/images/Antarctic_Ozone_Minimum.jpg

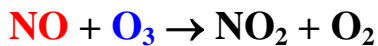
Joon. 3.2. Osoonikihi miinimumpaksused Antarktikas aastate kaupa.

Stratosfääris osooni fotokeemiline lagunemine toimub peamiselt **Antarktikas seasel kevadel**. Osooni lagunemist põhjustavad **neli ainet**, mis mõjuvad katalüsaatoritena: **1)** hüdroksüülradikaalid, **2)** lämmastikoksiidid, **3)** kloor, **4)** broom.

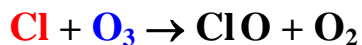
1. Hüdroksüülradikaal, **OH**, tekib vee molekuli lagunemisel UV-kiirguses ($\lambda < 200 \text{ nm}$).. Hüdroksüülradikaalil on seitse väliselektroni (6 hapniku, 1 vesiniku), mistõttu ta on keemiliselt üliaktiivne ja ebastabiilne:



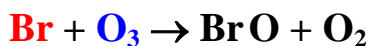
2. Lämmastikoksiidi osalusel toimuvad järgmised osooni lagundamise reaktsioonid:



3. Kloori toimel kulgeb osooni lagunemine:



4. Analoogselt reaktsioonid broomiga:



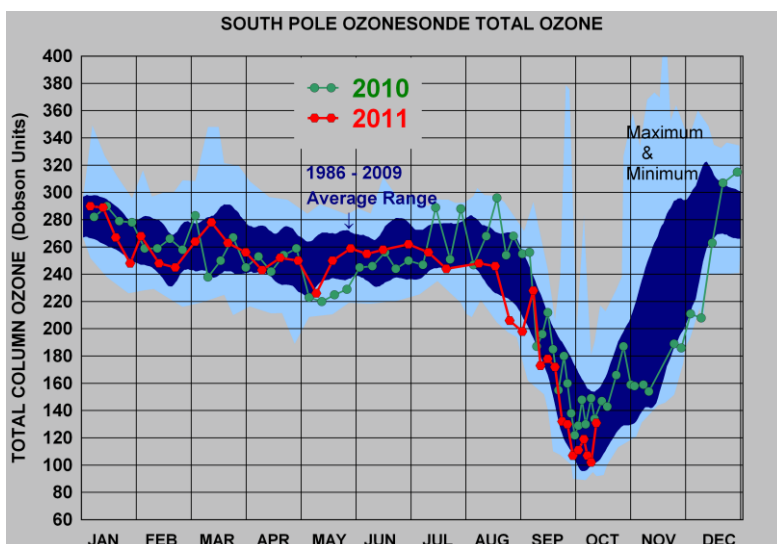
Antarktika osooniaugu tekkimise määrab mitme asjaolu kokkulangemine. Antarktika stratosfääris kujuneb külma polaaröö alguses korrapärane õhukeeris ehk polaartsüklon. Tugevate tuulte tõttu tsükloni välisservas ei pääse sellesse sisse ekvaatori poolt saabuv osoonirikas soojem õhk. Polaartsükloni sees olev õhk jahtub väga madalate temperatuurideni (alla $-78 \text{ }^\circ\text{C}$) ning algab **lämmastikhappe trihüdraadi $\text{HNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ külmumine**. Tekivad **polaarsed stratosfääripilved (PSC)** ehk **pärilmutterpilved (12–25 km)**. Praegu pole veel päris selge, kuidas need pilved sisaldavad ka lämmastikhappe **dihüdraadi** ja **monohüdraadi** jääd. Veeauru molekulid jäävad koorikuna juba olemasolevate lämmastikuühendite pinnale. Pärilmutterpilvede pinnal toimuvad talve jooksul nn heterogeensed keemilised reaktsioonid, mille käigus satuvad õhku Cl_2 ja NO_x .

homogeensed keemilised reaktsioonid – kas ainult gaasiliste või ainult vedelate ainete vahel

heterogeensed keemilised reaktsioonid – kas tahkis-tahkis, tahkis-vedelik, tahkis-gaas või vedelik-gaas

Päikese ilmudes laguneb Cl_2 atomaarseks klooriks, $\text{Cl}_2 \rightarrow \text{Cl} + \text{Cl}$.

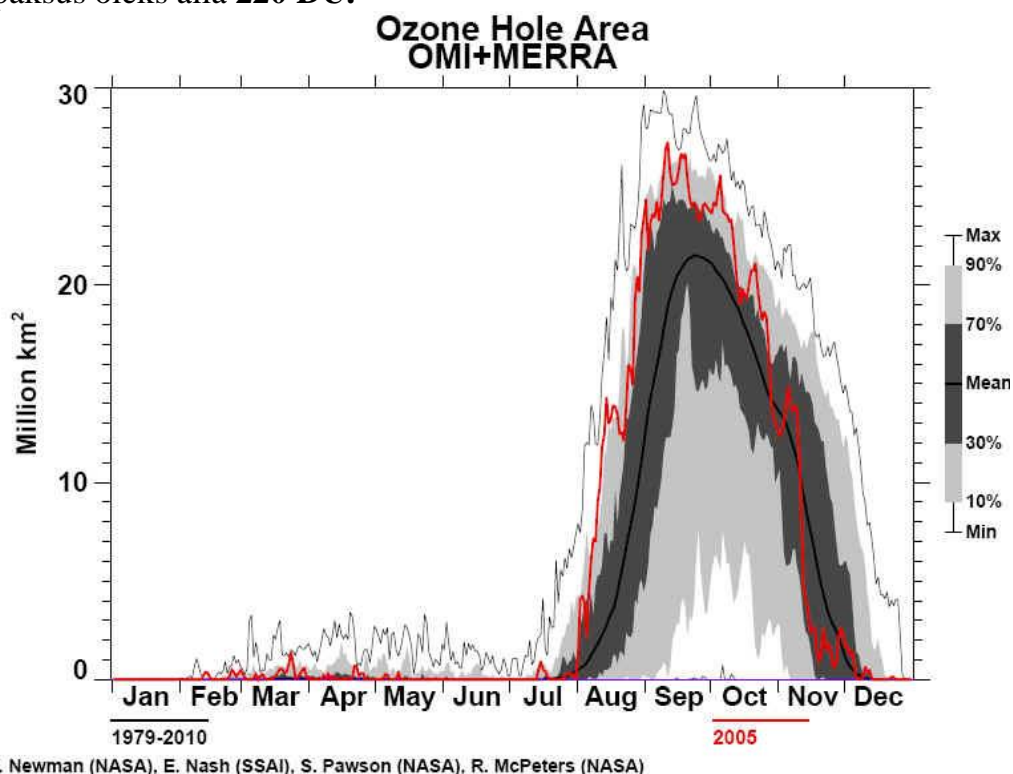
Algab intensiivne osooni katalüütiline lagundamine kuni polaartsüklon soojenemise tõttu ise laguneb, kokku püsib osooniauk **ca 3 kuu** vältel.



http://www.noaaneews.noaa.gov/stories2011/images/spole_totaloz_2011_oct12.png

Joon. 3.3. Antarktika osoonikiht kalendrikuude kaupa, miinimum on oktoobris.

Et Antarktika piirkond kvalifitseeruks osooniauguks, on kokku lepitud, et summaarne osoonikihi paksus oleks alla **220 DU**.



P. Newman (NASA), E. Nash (SSAI), S. Pawson (NASA), R. McPeters (NASA)

<http://www.theozonehole.com/images/ozoneh2005area3.jpg>

Joon. 3.4. Ülevaade Antarktika osooniaugu pindala sesoonselt muutumisest. Musta ja punase joone tähendused on vahetult horisontaaltelje all (võiksid olla joonise sees).

Joonise 3.4 järgi on Antarktika osooniaugu pindala ulatunud peaaegu **30 miljoni km²**, ületades enam kui **kahekordselt** Antarktika enda pindala (**13·10⁶ km²**). See tähendab, et osooniaugu maksimaalne raadius oli **ca 3000 km**.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007) hinnangul saavutas Antarktika osooniauk oma maksimaalse sügavuse **aastal 2000 (< 100 DU)**, sellest edaspidi osoonikiht kasvab. Kuid 1980. aasta tase saavutatakse (Antarktikas) alles aastaks 2065, aga 1960te aastate (Antarktika) taseme taastumist isegi ei prognoosita. Taastumine sõltub peamiselt sellest, kuidas ja kas üldse, õnnestub vähendada atmosfääris **halogeenide hulka**. Näiteks

kloori hinnatakse praegu atmosfääris **5 korda rohkem**, kui enne **1750.** aastat. Alates **1960.** aastast on aga kloori hulk kasvanud **3.5 korda**.

Montreali, Kyoto jne rahvusvaheliste kokkulepetega üritatakse osoonikihti kaitsta.

Kuna osoon on kasvuhuonegaas, siis õhem osoonikiht Antarktika kohal muudab Antarktika kliimat pisut jahedamaks, seega osooniauk töötab vastu kliima soojenemisele. Kui osoonikihi taastumine Antarktika kohal jätkub, siis vastavalt soojeneb Antarktika kliima, seega ka kogu planeedi kliima (E. Kaup, *personal communication*, 04-Mar-2019).

3.4. Osoon Eesti kohal

Minimaalsed väärtused – sügisel, oktoobris-novembris, kuid harilikult mitte alla **200 DU**.

Minimaalseim – 181 DU, 20. dets 2007.

Maksimaalsed väärtused – talve lõpul ja varakevadel, veebruaris, märtsis, aprillis, harilikult mitte üle **400 DU**, kuid 21. veebruaril 2002 tõusis osoonikihi paksus Eesti kohal väga kõrge väärtuseni, **546 DU**.

3.5. Osoonikogus molekulide arvu kaudu

Atmosfääris sisalduva osoonikoguse taandamine standardsetele rõhu ja temperatuuri väärtustele sisaldab võimalust nende väärtustega manipuleerida ja neid segi ajada. Näiteks kliimamuutuste sõnastikus *Dictionary of Global Climate Change* (W. John Maunder and the Stockholm Environment Institute, 1992), on lk 75 öeldud, et taandamine toimub küll rõhule **1013 hPa**, kuid hoopis standardtemperatuurile **298°K**, viimasele vastab aga **25°C**, mitte traditsiooniline **0°C**.

Ostarbekam on atmosfääris oleva mingi gaasi koguse väljendamine molekulide arvu järgi ühikulise ristlõikega vertikaalses sambas. Sellisel juhul puuduvad definitsioonist taandamisprobleemid. Dobsoni ühiku definitsioon osoonimolekulide arvu järgi on järgmine:

üks Dobsoni ühik vastab $2.69 \cdot 10^{20}$ osoonimolekulile 1 ruutmeetrilise ristlõikega vertikaalses atmosfäärisambas.

Näidisülesanne. Uuritav gaas koosneb ühele Dobsoni ühikule, **1 DU**, vastavast osoonimolekulide hulgast, **$2.69 \cdot 10^{20}$ molekuli**. Gaas on paigutatud **1 m²** ristlõikega vertikaalsesse risttahukasse normaalingimu stel (**760 mmHg, 0°C**). Leida risttahuka kõrgus (gaasikihi paksus).

Lahendus. Kasutame fakti, et **$1 \text{ m}^3 = 1 \text{ m}^2 \times 1 \text{ m}$** mistahes gaasi sisaldab normaalingimustel **Loschmidti arvu** ehk **$2.69 \cdot 10^{25}$** molekuli. Koostame seosed:

1 m² ristlõikega risttahukas kõrgusega **1 m** sisaldab **$2.69 \cdot 10^{25}$** molekuli,

1 m² ristlõikega risttahukas kõrgusega **h** sisaldab **1 DU = $2.69 \cdot 10^{20}$** molekuli, järelikult, vastav risttahuka kõrgus **h** peab olema **1-st meetrist** väiksem **10^5** korda:

$$h = 10^{-5} \text{ m} = 0.01 \text{ mm}.$$

3.6. Bidoos ja erinevad nahatüübid

Bidoos ehk *minimaalne erüteemne doos*, *MED*, kui nõrga päikesepõletuse biofüüsikaline ühik, on väikseim kiiritusdoos, mis kutsub esile päevitamata naha punetuse. Füüsikaliselt on bidoos ühikulisele pinnale teatava aja jooksul langev päikesekiirguse (päikesevalguse) **UV-piirkonna** summaarne kiirgusenergia (UV-spekter tuleb eelnevalt kaaluda mõjuspektriga).

Päevitamisel on oluline teada, kui kiiresti võiks **1 MED** koguneda ehk teisisõnu, kui kiiresti toimub päevitamine või põletuse saamine. Füüsikalisi-bioloogilise suurusena kasutatakse doosi kogunemise kiirust, ühik **MED/h**.

Punetuse tekkimine oleneb naha omadustest, põhjamaalase nahk on päikese põletuse suhtes õrnem lõunamaalase nahast, seega on MED-le vastav energeetiline kiiritusdoos sõltuv naha tüübist (sünnipärasest tumedusest). Üks võimalik dermatoloogide poolt pakutud nahatüüpide klassifikatsioon koosneb **kuuest** alajaotusest (K. Eerme → USA Dermatoloogide Selts):

- 1) **valge I**, päikese kiirguse suhtes väga õrn nahk, millega sageli kaasnevad punakad juuksed, teträhnid, nahk muutub kergesti punaseks kuid **peaaegu ei pruunistu**;
- 2) **valge II**, nn kaukaasia nahk (nimetuse päritolu pole teada), punetav nahk muutub mõne päevaga pruuniks, mis kaitseb edaspidi punetumise eest; **siia nahatüüpi loetakse kuuluvaks enamuse eestlasi**, kuigi ilmselt oleks vajalik vahepealne alajaotus;
- 3) **valge III**, lõunamaades elavad valge rassi esindajad, näiteks araablased;
- 4) **helepruun**,
- 5) **pruun**,
- 6) **must**.

Erinevate nahatüüpide jaoks on **MED** ja sellele vastav **UV-kiirguse energiahulk pinnaühikule (J/m^2)** väga erinev, **orienteeruvad väärtused** on järgmised (vaikne eeldus – ühe päeva jooksul kogunev UV kiirgusenergia doos):

- **1 MED (valge I) = $200 J/m^2$,**
- **1 MED (valge II) = $250 J/m^2$,**
- **1 MED (valge III) = $350 J/m^2$,**
- **1 MED (helepruun) = $500 J/m^2$,**
- **1 MED (pruun) = $800 J/m^2$,**
- **1 MED (must) = $1500 J/m^2$.**

Doos koguneb kiiremini keskpäeval **tõelise päikeseaja järgi (TST – True Solar Time)**, mil Päike on kõige kõrgemal.

3.7. Tõeline päikeseaeg, ajavõrrand

Kohalik keskmine aeg = keskmine kohalik päikeseaeg. Greenwichi meridiaani kohalikule keskmisele ajale (**GMT – Greenwich Mean Time**, täpsemalt, **UTC**) tuginev ajastüsteem, milles **UTC-d on korrigeeritud** vastavalt asukoha (näiteks Tõravere) meridiaani idapikkusele, ***E***:

$$\text{kohalik keskmine aeg} = \text{GMT} + \frac{1}{15}E, \quad (3.7.1)$$

kus ***E*** on asukoha idapikkus kraadides. Kohaliku keskmise aja järgi kulmineerub Päike igapäevaselt ligikaudu kell **12**, erinedes sellest ca **± 15 min**. Kui aga arvutada **Päikese kulmineerumiskõrguse aastakeskmine aeg**, siis on see **12:00** kohaliku aja järgi.

Märkus. Korreksem on **GMT** asemel kasutada universaalse baasajastüsteemina **UTC-d (UTC – Universal Time Coordinated)**, mis on ühtlasema käiguga ja erineb **GMT**-st kuni **±0.9 sekundit**. Termin **GMT** jätkuv kasutamine ei ole segav, tegemist on nn professionaalse lohakusega. Samas, **GMT** tähendus on üldmõistetav, **UTC** oma aga sageli mitte.

Planeet on jaotatud ajavöönditeks (**23+2**), milles administratiivajaks on vastava vööndi keskmeridiaani kohalik keskmine aeg. Greenwichist järgmises, idapoolses ajavööndis, kus kellad edestavad GMT-aega **1 h võrra** on kasutusel nn *Kesk-Euroopa* (talve)aeg. Veel järgmises, idapoolses ajavööndis, kuhu kuuluvad ka **Eesti ja Soome**, on kasutusel nn *Ida-Euroopa* (talve)aeg, mis edestab GMT-d juba **2 h**. Soojemal aastapoolel kasutab enamus riike nn **suveaega**, milles kellad nihutatakse vööndiajast **1 h** võrra ettepoole.

Päikesekiirguse mõõtmisega tegelevatele meteoroloogidele (aktinometristidele) sobiks aga hoopis selline ajasüsteem, milles antud asukohas, sõltumata meridiaanist, oleks **igapäevaselt kell 12:00 Päikese kõrgus maksimaalne**.

Tõeline päikeseaeg (TST) ongi selline ajasüsteem, milles **kell 12:00 TST** on Päikese kõrgus antud päeval antud geograafilise idapikkuse juures maksimaalne. Osutub aga, et ühtlase osutite käiguga kella ei saa seada selliselt, et see igapäevaselt näitaks tõelist päikeseaega. Seda saab teha ainult teatava täpsusega. Kui jälgida Päikese kõrgust ja seada **täna** kella osutid näitamaks **12:00** hetkel, kui Päike kulmineerub, siis **homme** kulminatsiooniaeg erineks tänasest ca **30 sek**. Kahe päevaga võib erinevus olla juba **ca 1 min**.

Erinevuse kohaliku keskmise aja ja tõelise päikeseaja vahel tingib põhiliselt Maa orbiidi elliptilisus, vähemal määral Kuu ja planeetide mõju. Ajasüsteemide erinevus leitakse nn **ajavõrrandi järgi arvatava parandiga**:

tõeline päikeseaeg = kohalik keskmine aeg – ajavõrrandiga arvatav parand.

Meteojaamades, kus Päikese kõrgusega seotud mõõtmiste tegemiseks üks seinakelladest töötab tõelises päikeseajas, tuleks seda kella vähemalt ülepäeviti ajavõrrandi järgi korrigeerida. Kuna ajavõrrandi järgi parandi arvutamine on keerukas (nõuab mitmete taevamehhaanika parameetrite arvutamist), on need arvutused, antud kalendriaastaks, eelnevalt teostatud rahvuslike observatooriumite, mereteenistuste jne poolt. Arvutustulemused publitseeritakse astronoomilistes almanahhides ja kalendrites. Eestis võib ajavõrrandiga arvatud parandid leida Tartu Tähetorni kalendritest (**Tartu TTK**). Kuna parand aastast aastasse palju ei muutu, kasutatakse aktinomeetrilistes arvutustes, eriti keskpäeva ümbruses, ka suvalise aasta kalendrit.

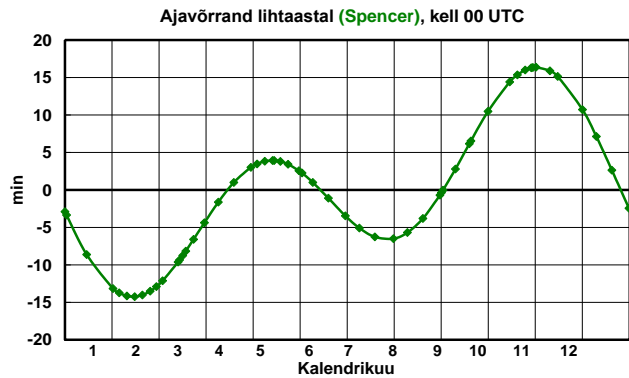
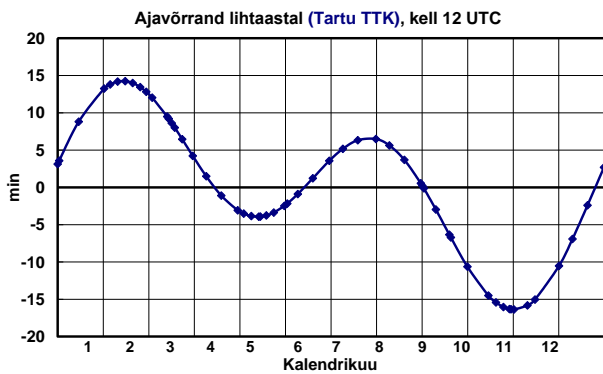
Tõeline päikeseaeg avaldub:

$$TST = GMT + \frac{1}{15} E - AV(Tartu TTK), \quad (3.7.2)$$

kus E asukoha idapikkus kraadides, ja $AV(Tartu TTK)$ tähistab Tartu Tähetorni kalendris toodud parandit. Rahvusvahelise praktika järgi nimetatakse seda parandit lihtsalt **ajavõrrandiks** (*equation of time*), tegemist on jällegi professionaalselt lohaka terminite kasutusega. Termin "**ajavõrrand**", konkreetsete **tabuleeritud arvude** tähistamiseks on aga üldlevinud, nii tehakse ka Tartu Tähetorni kalendris. Eestis kasutatava ajavõrrandi aastane käik lihtaasta jaoks on toodud joonise 3.5 vasakus paneelis.

Märkus, Lääneriikides kasutusel olev ajavõrrand erineb Eesti omast **vastupidise märgi poolest** (joon. 3.5 parempoolne paneel). Kasutades näiteks Austraalia teadlase Spenceri (1971, *Fourier series representation of the position of the sun*) populaarseid valemeid ajavõrrandi arvutamiseks, saadakse Tartu Tähetorni kalendrile ligilähedased, kuid vastasmärgiga tulemused. Tõelise päikeseaja arvutamine toimuks siis valemi järgi, kus ajavõrrandi parand **liidetakse kohalikele keskmisele ajale**:

$$TST = GMT + \frac{1}{15} E + AV(Spencer), \quad (3.7.3)$$



Joon. 3.5. Ajavõrrandi aastane käik lihtaastal Tartu Tähetorni kalendri järgi ning rahvusvaheliselt tuntud Spenceri valemite järgi (graafikud vastasmärgilised).

[HAN-AILL\At-opt-I\ET+Decl_2015\Fig_ET2002\(Tartu TTK\); Fig Fig_ET2002 \(Spencer\)](#)

Vaatame näitena tõelise päikeseaja ja ajavõrrandi kasutamist **20. juunil Tõravere meteojaamas**, mille **geograafilised koordinaadid**:

põhjalaius, $N = 58^{\circ}16'$ (TST arvutustes ei lähe seda vaja, tähtis on vaid meridiaan),

idapikkus, $E = 26^{\circ}28' = 26.467^{\circ} = 26.467^{\circ} \frac{24\text{h}}{360^{\circ}} = \frac{26.467}{15} \text{h} = 1.764 \text{h}$,

$$TST(\text{Tõravere}) = GMT + 1.764 \text{ h} - AV(\text{Tartu TTK}). \quad (3.7.4)$$

Tartu Tähetorni kalendrist (aktinomeetrilises praktikas kasutatakse mistahes aasta kalendrit) leiame ajavõrrandi väärtuse **20. juunil**:

$$AV(20. \text{ juuni, Tartu Tähetorni kalender}) \approx 1.5 \text{ min} = 0.025 \text{ h},$$

$$TST(\text{Tõravere, 20-June}) = GMT + 1.764 \text{ h} - 0.025 \text{ h}, \quad (3.7.5)$$

$$TST(\text{Tõravere, 20-June}) = \underbrace{GMT}_{\substack{\uparrow \\ \text{Avaldame GMT Eesti suveaja kaudu}}} + 1.739 \text{ h}. \quad (3.7.6)$$

Avaldame GMT Eesti suveaja kaudu

$$GMT = \text{Eesti suveaeg} - 3 \text{ h},$$

$$TST(\text{Tõravere, 20-June}) = \text{Eesti suveaeg} - 3 \text{ h} + 1.739 \text{ h}, \quad (3.7.7)$$

$$TST(\text{Tõravere, 20-June}) = \text{Eesti suveaeg} - 1.261 \text{ h}, \quad (3.7.8)$$

$$TST(\text{Tõravere, 20-June}) = \text{Eesti suveaeg} - 1 \text{ h } 15.7 \text{ min}, \quad (3.7.9)$$

ligikaudselt juunis:

$$TST(\text{Tõravere, June}) \approx \text{Eesti suveaeg} - 1 \text{ h } 15 \text{ min}, \quad (3.7.10)$$

või vastupidi, Eesti suveaeg TST kaudu juunis (üldistame Tõravere tingimusi kogu Eestile):

$$\text{Eesti suveaeg} \approx TST + 1 \text{ h } 15 \text{ min}. \quad (3.7.11)$$

3.8. Bidoosi kogunemise kiirus

Kuna keskpäeva ümbruses Päikese kõrgus muutub vähe, võib lugeda, et keskpäevane Päikese kõrgus säilib meil ajavahemikus **kell 11–13 TST** ($\approx 12:15\text{--}14:15$ Eesti suveaeg).

Küsime nüüd üldiselt, millised on doosi kogunemise arvulised väärtused suvise keskpäeva ümbruses erinevates geograafilistes piirkondades? Vastus sõltub päevitamiskoha geograafilisest laiusel (määrab Päikese kõrguse), pilvisusest ja nahatüübist.

Nii katsed kui arvutused näitavad, et Eesti geograafilistel laiustel on **valge II nahatüübi** jaoks päikesekiirguse intensiivsus $\approx 3 \text{ MED/h}$ kevadsuvisel pilvitu keskpäeva ümbruses (**11–13 TST**). Seega **ühe tunni** jooksul jõuaks nahk punetuda “**kolm korda järjest**”.

Esmasel päevitamisel on soovitatav piirduda **1 MED**-ga, seega ajaliselt **20 minutiga** keskpäeva ümbruses (**11–13 TST**) või **30 minutiga** kell **10–11, 13–14**, vastavalt **40 minutiga** kell **8–10, 14–16** (vt järgnevat kellaaegade ja doosi kogunemise kiiruste loetelu).

Tundide (TST) kaupa koguneb kevadsuvel Eestis selge taeva korral esmasel päevitamisel **valge II nahatüübi** jaoks doos hinnanguliselt järgmiselt:

- **kell 6–7 TST, 0.5 MED**
 - **kell 7–8 TST, 1.0 MED**
 - **kell 8–9 TST, 1.5 MED**
 - **kell 9–10 TST, 1.5 MED**
 - **kell 10–11 TST, 2.0 MED**
 - **kell 11–12 TST, 3.0 MED**
 - **kell 12–13 TST, 3.0 MED**
 - **kell 13–14 TST, 2.0 MED**
 - **kell 14–15 TST, 1.5 MED**
 - **kell 15–16 TST, 1.5 MED**
 - **kell 17–18 TST, 1.0 MED**
 - **kell 18–19 TST, 0.5 MED**
- } seega koguneb üks **biodoos** keskpäeva ümbruses ca **20 minutiga**

Kokku: 19.0 MED päevas

Kuigi toodud tabel on hinnanguline, vastab ta Eestis teostatud mõõtmistele. Nimelt on Tõraveres mõõdetud maksimaalseks päevaseks päevitamisdosisiks **19 MED**. Lõunapoolsematel aladel (päev lühem, aga päike kõrgemal) võib päevane doos, eriti mäestikes, ulatuda üle **20 MED**.

Eesti meedikute soovitus on piirduda **valge II nahatüübi** korral esmasel päevitamisel keskpäeval **20 minutiga**, õrnema naha korral veelgi lühema ajaga.

Mõõdukal päevitamisel jääb domineerima **UV kiirguse soodne toime**, mis soodustab **D-vitamiini** sünteesi ja hävitab õhus haiguste tekitajaid. Sellepärast ei tulegi päevitamist vältida vaid tuleb päevitada parajal määral.

Õrna, **valge I** nahatüübi korral (samuti imikutel) võib päevitamist alustada varjus olles. Nimelt läbib ultraviolettkiirgus atmosfääri sirgjooneliselt palju halvemini kui nähtav valgus. Põhjuseks on **molekulaarse ehk Rayleigh hajumise** proportsionaalsus λ^{-4} astmega. Õhu molekulidel hajumise tõttu jõuab UV-kiirgus päevitajani kõikvõimalikest suundadest. Päikese nn otsekiirguse osa küünib pooleni summaarsest vaid südasuvisel keskpäeva paiku, madalama päikese korral jääb aga hajuskiirgusele järjest rohkem alla.

Ka lauspilves ilmaga jõuab aluspinnani teatav kogus UV-d. Mägedes (**ca 2 km**) on UV kiirgust ka **täiesti pilves ilmaga**, lauspilvisuse ja lumikatte korral saadakse biodoos (näonahk punaseks) 4–5 tunniga.

3.9. UV-indeks

Pidades silmas teavitada UV-kiirguse intensiivsusest üldsust (turistid, suvitajad, ehitus- ja teetöölised, solaariumite kasutajad jne) lühidalt ja arusaadavalt, aga samas piisavalt tehnoloogiliselt, on viimastel aastakümnetel, peamiselt siiski Euroopa Liidu maades, hakatud kasutama nn *UV-indeksit*, mis on seotud **aparatuurselt mõõdetava UV-kiirguse intensiivsusega** ühikutes **25 mW/m²** ja mis annab kiiritustiheduse **füüsilise hetkväärtuse** (kiirgusvõimsus pinnauhiku kohta) ega sõltu nahatüübist:

- **UV-indeks = 1:** sellele vastab **25 mW/m²** erütemse UV-kiirguse kiiritustihedust
- **UV-indeks = 2:** **50 mW/m²**
- **UV-indeks = 3:** **75 mW/m²**
- **UV-indeks = 4:** **100 mW/m²**
- **UV-indeks = 5:** **125 mW/m²**
- **UV-indeks = 6:** **150 mW/m²**
- **UV-indeks = 7:** **175 mW/m²**
- **UV-indeks = 8:** **200 mW/m²**
- **UV-indeks = 9:** **225 mW/m²**
- **UV-indeks = 10:** **250 mW/m²**
-
- **UV-indeks = 20:** **500 mW/m² = 0.5 W/m²**

Indeksi suuremad väärtused näitavad suuremat ohtu.

Teeme mõned arvutused energia **1 MED** kogunemise aegade kohta. Lähtume esmalt kõige õrnemast, **valge I** nahatüübist, mille jaoks minimaalne erütemne doos omas väärtust

$$1 \text{ MED (valge I)} = 200 \text{ J/m}^2,$$

ja võtame kõige nõrgema UV-indeksi, **UV-indeks = 1**, millele vastab kiirguse hetkväärtus ehk doosi kogunemise kiirus,

$$\frac{25 \text{ mW}}{\text{m}^2} = \frac{25 \cdot 10^{-3} \text{ J}}{\text{m}^2 \text{ s}}.$$

Kiirgusdoosi **1 MED (valge I) = 200 J/m²** saamiseks, **UV-indeks = 1** korral, kulub aega:

$$t = \frac{200 \text{ J} \times \text{m}^2 \text{ s}}{\text{m}^2 \times 25 \cdot 10^{-3} \text{ J}} = \frac{8 \cdot 10^3 \text{ s}}{1} \approx \underline{\underline{2 \text{ h } 13 \text{ min}}}$$

Vastupidavama nahatüübi, **valge II** korral on minimaalse erütemse doosi suurus suurem:

$$1 \text{ MED (valge II)} = 250 \text{ J/m}^2,$$

UV-indeks = 1 korral kulub **valge II** korral doosi saamiseks aega:

$$t = \frac{250 \text{ J} \times \text{m}^2 \text{ s}}{\text{m}^2 \times 25 \cdot 10^{-3} \text{ J}} = \frac{10 \cdot 10^3 \text{ s}}{1} \approx \underline{\underline{2 \text{ h } 47 \text{ min}}}$$

Kordame samu arvutusi **UV-indeks = 2** korral. Dooside väärtused on samad, kuid kiirgus on **kaks korda intensiivsem**, järelikult koguneb doos kaks korda kiiremini.

Doosi **1 MED** kogunemiseks **valge I** nahatüübile **UV-indeks = 2** korral kulub aega:

$$t = \frac{200 \text{ J} \times \text{m}^2 \text{ s}}{\text{m}^2 \times 50 \cdot 10^{-3} \text{ J}} = \frac{4 \cdot 10^3 \text{ s}}{1} \approx \underline{\underline{1 \text{ h } 7 \text{ min}}}.$$

Doosi **1 MED** kogunemiseks **valge II** nahatüübile **UV-indeks = 2** korral kulub aega:

$$t = \frac{250 \text{ J} \times \text{m}^2 \text{ s}}{\text{m}^2 \times 50 \cdot 10^{-3} \text{ J}} = \frac{5 \cdot 10^3 \text{ s}}{1} = 5000 \text{ s} \approx 83.33 \text{ min} = \underline{\underline{1 \text{ h } 23 \text{ min}}}.$$

Võtame järgmise UV-kiirguse intensiivsuse, **UV-indeks = 3** ja arvutame ajad.

Doosi **1 MED** kogunemiseks **valge I** nahatüübile **UV-indeks = 3** korral kulub aega alla **1 h**:

$$t = \frac{200 \text{ J} \times \text{m}^2 \text{ s}}{\text{m}^2 \times 75 \cdot 10^{-3} \text{ J}} = 2667 \text{ s} \approx \underline{\underline{44 \text{ min}}}.$$

Doosi **1 MED** kogunemiseks **valge II** nahatüübile **UV-indeks = 3** korral kulub aega:

$$t = \frac{250 \text{ J} \times \text{m}^2 \text{ s}}{\text{m}^2 \times 75 \cdot 10^{-3} \text{ J}} = 3333 \text{ s} \approx \underline{\underline{56 \text{ min}}}.$$

Asustatud piirkondadest on suurimaid **UV-indeksi väärtusi**, **UV-indeks = 20**, registreeritud Tiibeti platool. Leiame, kui ruttu koguneb seal **valge I** nahatüübil **1 MED** ehk **200 J/m²**.

Nagu nähtub eespool toodud loetelust, vastab **UV-indeksile 20** kiiritustihedus:

$$0.5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 0.5 \frac{\text{J}}{\text{s m}^2}.$$

Sellise kiiritustihedusega kulub **valge I** nahatüübil erüteemse kiiritusdoosi **200 J/m²** kogunemiseks aega:

$$t = \frac{200 \text{ J} \times \text{m}^2 \cdot \text{s}}{\text{m}^2 \times 0.5 \text{ J}} = 400 \text{ s} = \underline{\underline{6 \text{ min } 40 \text{ s}}} = \underline{\underline{6.67 \text{ min}}}.$$

Doosi **1 MED** kogunemiseks **valge II** nahatüübile **UV-indeks = 20** korral kulub aega:

$$t = \frac{250 \text{ J} \times \text{m}^2 \cdot \text{s}}{\text{m}^2 \times 0.5 \text{ J}} = 500 \text{ s} = \underline{\underline{8 \text{ min } 20 \text{ s}}} = \underline{\underline{8.33 \text{ min}}}.$$

Seega, Tiibeti platool peaks **valge I** nahatüübiga inimesel esimene päevitusseanss kestma **ca 6 minutit** ja **valge II** nahatüübiga inimesel **ca 8 minutit**. Tunni jooksul kogunev dooside arv on vastavalt

$$\frac{60 \text{ min} \cdot \text{MED}}{6.67 \text{ min}} = 9.0 \text{ MED (valge I);} \quad \frac{60 \text{ min} \cdot \text{MED}}{8.33 \text{ min}} = 7.2 \text{ MED (valge II)}$$

Kaheksatuhandelistel mäetippudel on keskmised UV-indeksi väärtused veelgi suuremad.

Eespool toodud arvutuste järgi on koostatud järgnev tabel minimaalse eriteemse doosi ehk punetuse kujunemise aegadega.

Tabel 3.1. Orienteeruvad soovitud päevitamiskestused (1 MED saamise ajad)

UV-indeks	Hinnang kiirgusele	Aeg liigpõletuseni	
		Valge I nahk	Valge II nahk
1	Nõrk	2 h 13 min	2 h 47 min
2	Nõrk	1 h 7 min	1 h 23 min
3	Nõrk	44 min	56 min
4	Keskmine	35 min	42 min
5	Keskmine	25 min	40 min
6	Keskmine	22 min	35 min
7	Tugev	20 min	30 min
8	Tugev	17 min	25 min
9	Väga tugev	15 min	22 min
10	Väga tugev	13 min	20 min
...
20	Ülitugev (Tiibeti platoo)	6.67 min	8.33 min

Eestis on mõõdetud maksimaalseks UV-indeksiks **8.3**.

UV-indeksi reaajas graafik ja päeva maksimaalne väärtus on EMHI/KAUR kodulehel:

<http://www.ilmateenistus.ee/> → Ilm → Ilmavaatlused → UV kiirgus

UV-indeks Tõraveres

