Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Astronomijos observatorija

Liudvikas Taluntis

MĖNULIO MARE HUMORUM REGIONO RAUKŠLIŲ CHRONOLOGINIS TYRIMAS

Pagrindinių studijų baigiamasis darbas
Bendrosios fizikos studijų programa

Studentas:	Liudvikas Taluntis
Darbo vadovas:	dr. Audrius Bridžius
Recenzentas:	Saulius Raudeliūnas
VU observatorijos vedėjas:	prof. dr. Vladas Vansevičius

Vilnius 2017

Turinys

1. Įvadas 3
2. Datavimo metodas 4
2.1 Datavimas kraterių dydžio-dažnio pasiskirstymo metodu 4
2.2 Metodo problematika 5
3. Darbo metodika 6
3.1 Tiriamoji sritis 6
3.2 Kraterių registravimas 9
3.3 Amžiaus nustatymas 11
4. Rezultatai 14
4.1 Kontrolinių paviršių amžiai 14
4.2 Raukšlių amžiai 17
4.3 Palyginamieji CSFD grafikai 22
5. Rezultatų aptarimas 25
5.1 Kontroliniai paviršiai 25
5.2 Raukšlių paviršiai. 25
5.3 Raukšlių susiformavimo amžius. 26
6. Išvados 26
Literatūra 27
Santrauka 29
Summary 30

1. Įvadas

Dėl didelių atstumų nuo Žemės ir kylančių sunkumų, tiriant bandinius iš kitų Saulės sistemos kūnų, šių kūnų paviršiaus amžiai yra nustatinėjami nuotoliniu būdu, pasitelkiant kraterių dydžio-dažnio pasiskirstymo (*Crater size-frequency distribution* [CSFD]) matavimus. Šis metodas leidžia rasti santykinius tiriamo kūno paviršių amžius. Siekiant galimybės nustatinėti absoliučius paviršių amžius, metodas buvo sukalibruotas pasitelkiant Apolo ir Luna kosminių misijų dėka pargabentų Mėnulio uolienų radiometriniais amžiais. Pasitelkus šį metodą buvo nustatyta, kad jauniausi surasti Mėnulio paviršiai buvo geologiškai aktyvūs prieš laikotarpį prilyginamą ~1 Ga (Schultz ir Spudis, 1983).

2009 metais pradėjusio veiklą, LRO (*Lunar Reconnaissance Orbiter*) palydovo darytų nuotraukų dėka buvo atrasta iki tol neįžiūrimų, neįprastos formos struktūrų (Braden et al., 2014), o taip pat, atsiradus galimybei įžiūrėti smulkesnius kraterius, tapo įmanoma detaliau tirti smulkesnes struktūras. Vienas tokių darinių – Mėnulio paviršiaus raukšlės[1]. Šiame darbe bus tiriamas tokių raukšlių turintis regionas, esantis Drėgmės jūroje (Mare Humorum). Mėnulio amžius yra 4,51 Ga (Barboni et al., 2017), o Mare Humorum skirtingų regionų amžiai yra nuo 3,1 iki 3,75 Ga (Hiesinger et al., 2000). Manoma, kad raukšlės susiformavo dėl nuosėdinės medžiagos, sukėlusios mažiau mechaniškai atsparaus Mare Humorum paviršiaus susispaudimą, kuris vietomis pavirto raukšlėtumu (L. B. Ronka, 1965). Manoma, kad raukšlės susiformavo vėliau negu Mare Humorum, tačiau tikslus šių raukšlių amžius nėra žinomas. Raukšlių amžių nustatymas padėtų tiksliau atskleisti šio baseino geologinę evoliuciją.

Darbo tikslas – nustatyti Mare Humorum (Drėgmės jūros) vakarinio pakraščio raukšlių susiformavimo amžių.

Darbo uždaviniai:

- surasti ir išmatuoti į tiriamus regionus patenkančius kraterius;
- nustatyti produkcijos, nykimo ir šių procesų pusiausvyroje esančių kraterių populiacijas;
- nustatyti raukšlėtų paviršių ir šalia esančių neraukšlėtų paviršių amžių.

[1] Vizualiai panaši į raukšlę tektoninės kilmės struktūra.

2. Datavimo metodas

2.1 Datavimas kraterių dydžio-dažnio pasiskirstymo metodu

Siekiant nustatyti tiriamų paviršių amžių, naudojamas CSFD matavimo metodas. Krateriai formuojasi meteoritams krentant ant, šiuo atveju, Mėnulio paviršiaus. Kraterių kiekis ant paviršiaus, kurio neveikia geologiniai procesai, didėja senstant tam paviršiui. Jei paviršius bombarduojamas meteoritų pakankamai ilgai, yra pasiekiama pusiausvyra tarp kraterių nykimo ir jų kūrimo, kuri aprašoma pusiausvyros funkcija (Hartmann ir Gaskell, 1997). Matavimai atliekami skaičiuojant kiek ir kokio skersmens kraterių yra pasirinktame plote. Krateriai suskirstomi į intervalus (*binus*), suskaičiuojamas juos atitinkantis dažnis (čia iš tikrųjų yra dažnis į ploto vienetą (tankis), tačiau toliau bus vadinamas dažniu). Tai padarius gaunamas tame plote esančių kraterių dažnio bei dydžio sąryšis (CSFD).

Prie gautų taškų pritaikoma Mėnulio produkcijos funkcija[2] [1] ir [2] (Michael ir Neukum, 2010) kilnojant ją vertikaliai aukštyn arba žemyn. Perstumta produkcijos funkcija vadinama izochrona (1 pav.) - tai yra kreivė, ant kurios bet kurio taško amžius yra vienodas.

$$Kumulatyvinio\ vaizdavimo:\ logN_{cum} = p, kur\ p = \sum_{i=0}^{n} a_i x^i\ ir\ x = logD \quad [1]$$

$$Diferencialinio\ vaizdavimo:\ F = -\frac{dN}{dD} = -\frac{1}{D} \times 10^{\sum_{i=0}^{n} a_i x^i} \times \sum_{j=1}^{n} j a_j x^{j-1} \quad [2]$$

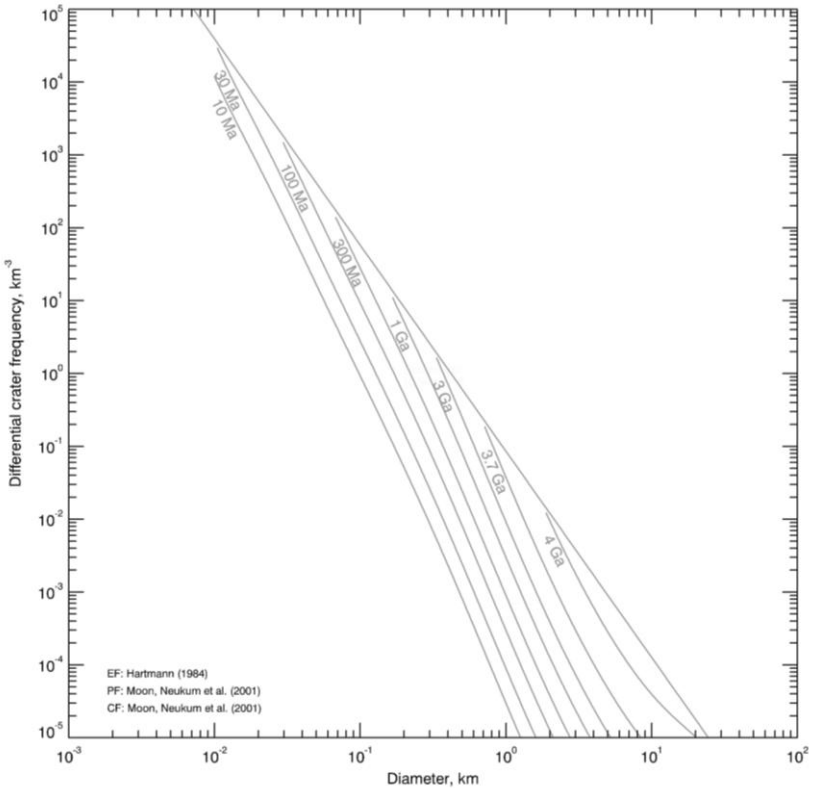
Čia D - kraterių skersmuo. N_{cum} - kumulatyvinis kraterių dažnis parodantis kraterių skaičių, su skersmenimis didesniais negu D, per ploto vienetą. a_i - polinomo aproksimavimo konstantos. F - diferencialinis kraterių tankis.

Priderintos produkcijos kreivės atitinkantį amžių galima rasti naudojantis Mėnulio chronologine funkcija [3] (Neukum, 1984), kuri nusako sąryšį tarp paviršiaus absoliutaus amžiaus t ir kraterių dažnio prie 1 km skersmens kraterių N(1). Taigi, gavus produkcijos kreivę, geriausiai derančią prie atlikto CSFD matavimo taškų, surandamas ant tos produkcijos kreivės kraterių dažnis prie 1 km skersmens kraterių. Gavus tą kraterių dažnį, surandamas jį atitinkantis amžius ant Mėnulio chronologinės funkcijos - tas amžius ir yra laikomas to paviršiaus modeliniu amžiumi.

$$N(1) = 5{,}44 \times 10^{-14} \times [e^{6{,}93t} - 1] + 8{,}38 \times 10^{-4} t \qquad [3]$$

[2] Kraterių dažnio pasiskirstymo funkcija 1 Ga laiko intervalui.

Mėnulio chronologinė funkcija buvo gauta susiejus Apollo ir Luna misijų nusileidimo aplinkose iš kraterių dažnių gautus santykinius amžius su iš tų vietų pargabentų uolienų radiometriniu būdu nustatytais absoliučiais amžiais (Neukum, 1984).



1 pav. CraterStats2 programoje naudojamos Mėnulio izochronos; tiesė virš jų - pusiausvyros funkcija. Izochronas apskaičiavo Neukum, 2001.

2.2 Metodo problematika

Šis metodas ir jame naudojamos funkcijos buvo sukurtos, kai buvo skaičiuojami krateriai, kurių skersmuo nemažesnis negu vienas kilometras. Tačiau pastaruoju metu amžiaus nustatymai yra atliekami paviršiams, kurių plotai siekia ir tik kelis kvadratinius kilometrus ar net mažiau, o pasitelkti skaičiavimui krateriai yra nuo kelių metrų iki kelių šimtų metrų skersmens (pvz., Braden et al., 2014). Atliekant skaičiavimus mažuose paviršiaus plotuose kyla statistinio patikimumo klausimas - problema kyla iš fakto, kad mažesniame plote yra mažiau kraterių. Kita vertus, van der Bogert et al. (2015) atliko kompiuterinius modeliavimus ir nustatė, kad paviršiams, kurių amžiai yra apie 100 Ma ir mažiau, galima statistiškai patikimai naudoti 1 km^2 plotą ir tikėtis rezultatų su ~10% nuokrypiu nuo tikrosios vertės. Šiame darbe visų tirtų sričių plotai yra didesni už 1 km^2, todėl laikytini statistiškai patikimais.

Taip pat kyla abejonės dėl amžiaus nustatymui naudojamų mažo skersmens kraterių patikimumo (Xiao ir Strom, 2012). Problema kyla dėl to, kad antriniai krateriai, užteršdami pirminius, dirbtinai pasendina tiriamą paviršių. Kadangi toli nuo pirminio susidarę antriniai krateriai yra sunkiai atpažįstami nuo lokalių irstančių pirminių, paviršiaus datavimas patampa kebliu procesu. Kita vertus, Hartmann (2007) teigia, kad antrinių kraterių tarša yra nedidelė, ir tai leidžia naudotis produkcijos funkcijomis. Taip pat antrinių kraterių įtaką galima sumažinti atmetant tas paviršiaus dalis, kuriose antriniai krateriai akivaizdžiai sukritę kaip grupės (klasteriai). Šiame darbe, apsibrėžiant matavimo plotus vietų su daugybe klasterių buvo vengta, kur įmanoma. Į jau apsibrėžtus tiriamus plotus patekę antrinių kraterių klasteriai nebuvo atmetinėjami, nes nebuvo aišku, ar aplinkui antrinių kraterių klasterius išsidėstę tokių pat matmenų krateriai irgi nėra antriniai, tik labiau išsibarstę nuo klasterių, su kuriais jie buvo atnešti.

Dirbant su CSFD svarbus dalykas, į kurį reikia atžvelgti, yra kraterių nykimo ir kūrimo pusiausvyra, kurią aprašo pusiausvyros funkcija. Kraterių populiacijai pasiekus pusiausvyrą, paviršiaus kraterių dažnis vidutiniškai nustoja didėti, dėl to stebimas kraterių dažnis nebeparodo tikrojo pasirinktos struktūros formavimosi amžiaus. Kai naudojamos mažų kraterių populiacijos, tai yra ypač svarbu, nes jos linkę pasiekti pusiausvyrą sparčiau. Teoriškai įvertinti pusiausvyros būseną kraterių populiacijoms yra sudėtinga, todėl dažniau naudojamos empirinės pusiausvyros funkcijos (Hartmann ir Gaskell, 1997). Šiame darbe naudota standartinė pusiausvyros funkcija, nustatyta Mėnuliui Trask (1966) darbe. Kraterių nykimą lemia tokie procesai kaip: aplinkui vykstantys tektoniniai procesai, užliejanti lava, seism· nės bangos, ateinančios nuo netoli nukritusių meteoritų, bei užklojimas, netoli kritusių meteoritų išmušta iš paviršiaus medžiaga. Pradedant „jaunais“ krateriais (3 pav. a, b) juos veikiant šiems procesams, jie pamažu pereina per visas 3 pav. pavaizduotas stadijas iki kol visai išnyksta. Fassett ir Thomson (2014) darbe nustatyta, kad mažesni krateriai nyksta greičiau negu dideli (pvz., 20 m skersmens krateriai suyra vidutiniškai per ~70 Ma, o 50 m - per ~400 Ma).

3. Darbo metodika

3.1 Tiriamoji sritis

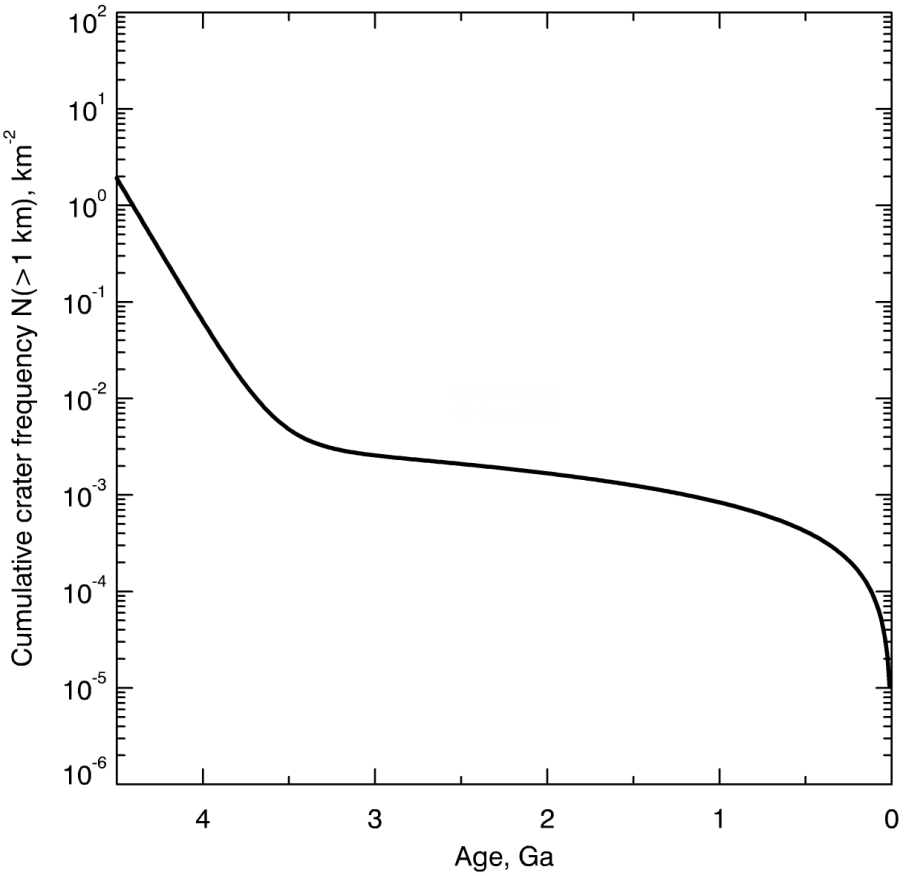
Šiame darbe buvo naudotos LRO siauro kampo kameros nuotraukos (*Narrow Angle Camera* [NAC]). Skirtingų nuotraukų skiriamoji geba keitėsi nuo 0,65 metro į pikselį iki 1,73 metro į pikselį, o paviršiaus apšvietimo kampas tarp Saulės ir paviršiaus normalės vektoriaus kito nuo 69 iki 84 laipsnių. Matavimams daryti, vienodų ar sąlygų kiekvienai raukšlei parinkti nepavyko dėl nepakankamo nuotraukų kiekio, arba dėl failo iškraipymo broko (pavyzdžiui, visiškai pilkas fonas vietoj nuotraukos), nuotraukos

išsiliejimo ar nesusifokusavimo tam tikrose jos vietose, arba galiausiai, dėl per didelio kontrasto. Detalesnė kiekvienos nuotraukos informacija pateikta lentelėje 1.

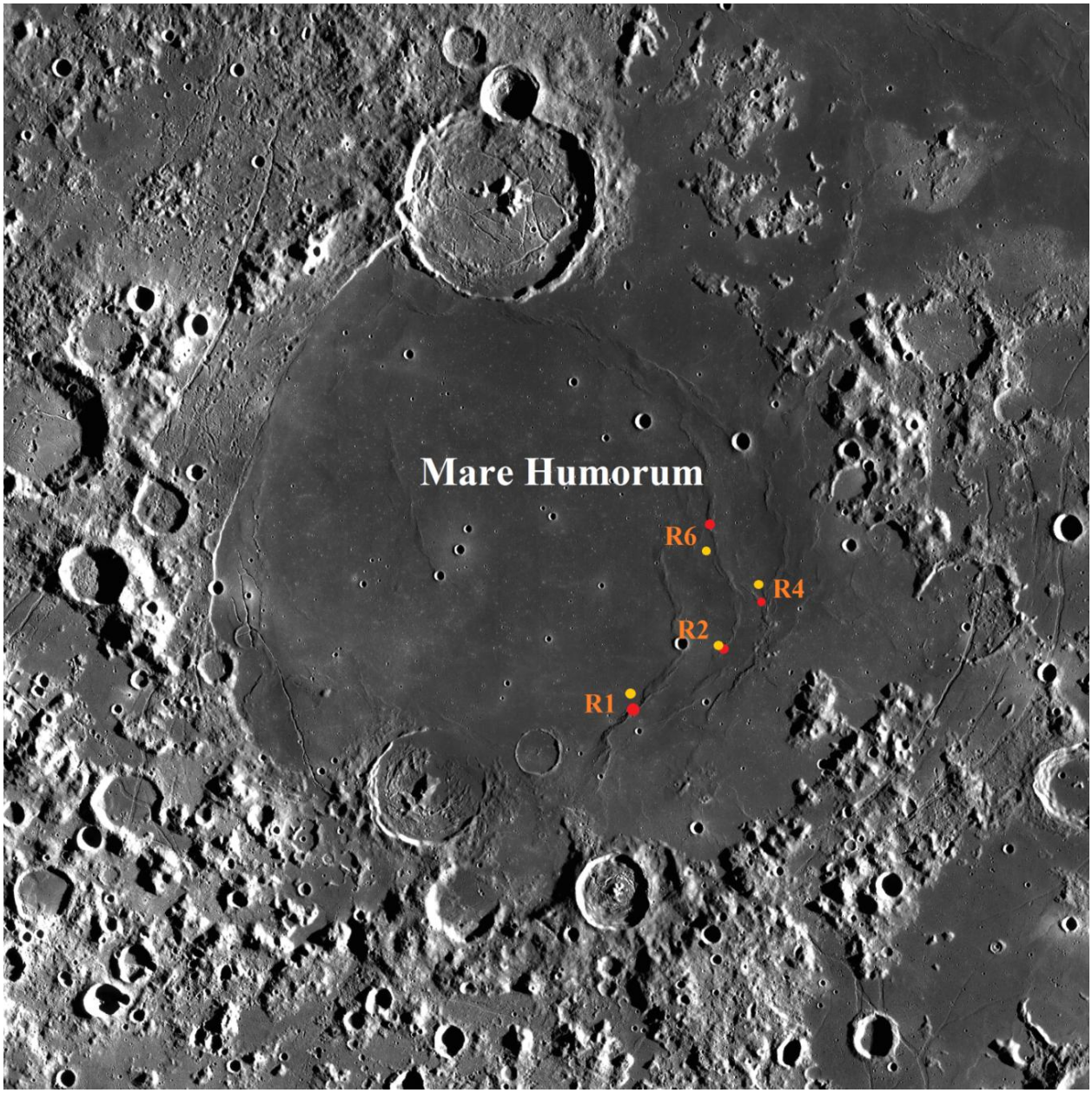
Lentelė 1. Naudotų nuotraukų informacija. Rn - n'toji raukšlė. RCn - šalia n'tos raukšlės esantis

Paviršiai	Nuotrauka	Skiriamoji geba, metrai/pikselį	Apšvietimo kampas, º
R1 + R1C	M133072400LE	0,85	84
R2a + R2C	M1096730387LE	0,65	69
R2b + R2C	M1096730387RE		
R4 + RC4	M193181656RE	1,73	75
R6 + RC6	M193188799RE	1,73	75

Šiame darbe tiriamas Drėgmės jūros (Mare Humorum) raukšlėtas regionas. Šiame regione matavimai buvo atlikti keturioms raukšlėms, parinktoms taip, kad jos būtų išsidėstę ant skirtingų susiraukšlėjimo sričių (3 pav.).



2 pav. CraterStats2 programoje naudojama Mėnulio chronologinė funkcija [3]. Apskaičiuota Neukum (1984).



3 pav. Tiriamo regiono vieta Drėgmės jūroje. Raudonai pažymėti ant raukšlių esantys plotai, o geltonai - šalia jų esantys kontroliniai plotai.

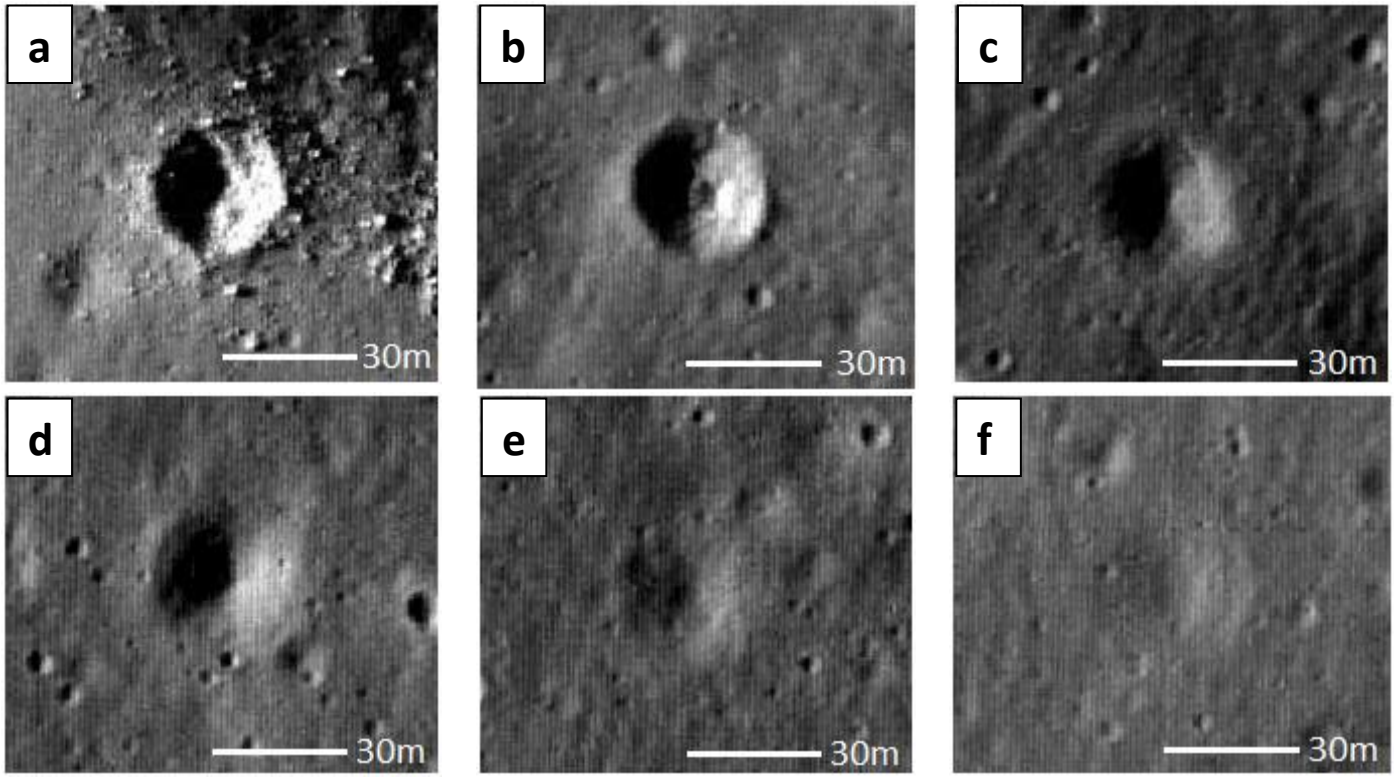
Matavimai daryti ne visoms raukšlėms, o tik jų dalims. Apsibrėžtas matavimų plotas skirtingoms raukšlėms buvo nuo 4 km^2 iki 6 km^2 , o šalia jų esantiems paviršiams - 4 km^2 , išskyrus šalia raukšlės 2 esantį paviršių, kurio plotas - 16 km^2**.** Visi pasirinkti plotai yra didesni negu minimalus leistinas pagal van der Bogert et al. (2015) tyrimą. Paviršių ribos buvo pasirinktos taip, kad tiriamasis paviršius būtų vizualiai, geologiškai homogeniškas. Priešingu atveju, dviejų skirtingų paviršių kraterių populiacijos susimaišys ir neduos tikslaus amžiaus. Tirtų paviršių nuotraukos pateikiamos 4.1 ir 4.2 poskyriuose (7-12 pav. a)

3.2 Kraterių registravimas

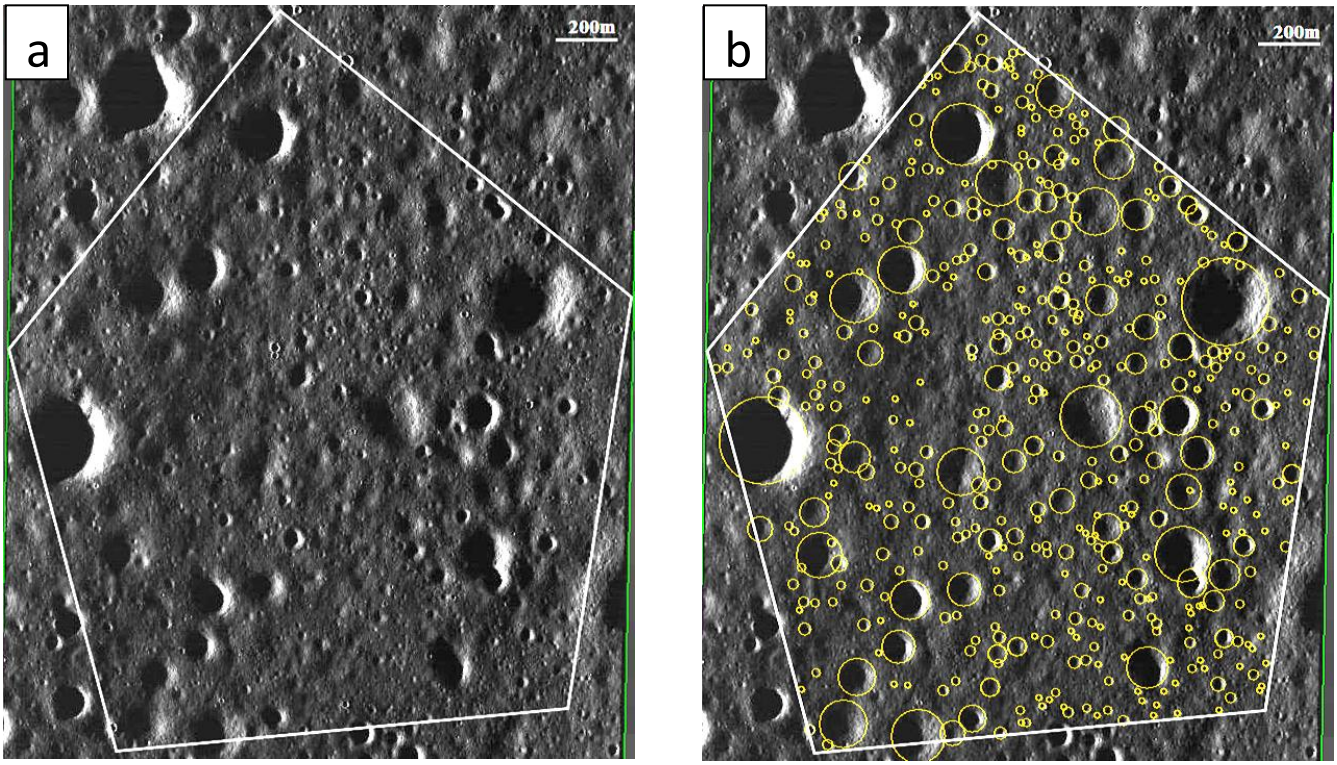
Krateriai buvo identifikuojami ir išmatuojami naudojantis programinės įrangos paketu - JMARS[3]. Pirmiausia duomenų bazėje surandamos geriausios kokybės pasirinkto paviršiaus nuotraukos. Ant šių nuotraukų, piešiant daugiakampes figūras, pažymimos pasirinkto tirti paviršiaus ribos, o jo plotą programa suskaičiuoja automatiškai. Krateriai skaičiuojami ir jų skersmuo nustatomas juos žymint po vieną rankiniu būdu (5 pav.). Tai daroma pritaikant tinkamo skersmens apskritimą ir jį uždedant taip, kad jis atitiktų kraterio kraštus. Šitai atlikus, programa duomenis apie kraterį (jo centro koordinates ir skersmenį) įveda į lentelę. Sužymėjus apsibrėžtame plote esančius kraterius, duomenys eksportuojami kaip .csv formato failas. Iš viso šio darbo eigoje tiriamuose plotuose buvo suregistruotas ir išmatuotas 5461 krateris (žiūrėti lenteles 2 ir 3)

Skaičiuojant kraterius ant raukšlių buvo žymimi visų degradavimo stadijų įžiūrimi krateriai (4 pav. a - f) su skersmeniu $D \geq \sim 13$ metrų. O skaičiuojant kraterius šalia raukšlės esančiuose kontroliniuose paviršiuose, žymimi krateriai su skersmeniu $D \geq 20$ metrų. Matavimai daryti skirtingomis sąlygomis nes tam tikrų kontrolinių paviršių mažus ir nusidėvėjusius kraterius buvo sunku atskirti nuo tiesiog paviršiaus nelygumų. Tiems kontroliniams paviršiams, kuriuose tokių sunkumų nekilo, taip pat buvo imtos tos pačios sąlygos tam, kad išliktų nuoseklumas vėliau tuos paviršius lyginant. Krateris pasitaikęs ant tiriamo paviršiaus ribos buvo įskaičiuojamas tik tuo atveju, kai daugiau nei pusė jo ploto patekdavo į tiriamąjį paviršių.

[3] https://jmars.asu.edu



4 pav. ~30 m skersmens krateriai skirtingose nykimo stadijose: pradedant nuo mažiausiai paveikto „jauno“ (a), baigiant beveik išnykusiu krateriu (f).



5 pav. Kraterių žymėjimo pavyzdys šalia 5-tos raukšlės esančiame paviršiuje RC5. a - prieš žymėjimą, b - po žymėjimo.

3.3 Amžiaus nustatymas

Eksportavus duomenis iš programos JMARS, siekiant juos analizuoti, jie buvo įkeliami į programą CraterStats2[4]. Kadangi Craterstats2 nepalaiko iš JMARS eksportuoto duomenų failo formato bei jų pateikimo, duomenys buvo rankiniu būdu pervedami į .diam formatą. Įkeltus duomenis Craterstats2 surūšiuoja ir perskaičiuoja į CSFD, o po to atvaizduoja juos grafiškai.

Yra keletas duomenų atvaizdavimo metodų, kurie kiekvienas turi savo privalumų ir trūkumų (Neukum, 1984). Šiame darbe daugiausia naudojami du iš jų - diferencialinis ir R-tipo. Įprastai yra naudojamas kumuliatyvinis vaizdavimas, kurio intervaluose (*bins*) imami visi krateriai su didesniu skersmeniu negu tas, kuris reprezentuoja intervalą (ant x ašies). Vaizduojant tokiu būdu iškyla problemų, kai dalis paviršiaus kraterių yra sunykę. Kai paviršius yra paveikiamas geologinių procesų ar meteoritų smūgių, labiausiai nutrinami mažiausi krateriai. Laikui einant nutrintų kraterių vietoje atsiranda naujų, tačiau jų dabar yra mažiau, negu būtų buvę, jei paviršius nebūtų buvęs pratrintas. Dėl to CSFD grafikuose ta taškų dalis, kuri atitinka mažų kraterių intervalus, pasislenka prie žemiau esančių izochronų (6 pav., a). Todėl centriniai taškai, esantys tarp statesnių taškų sekų, atvaizduojančių jauno ir seno paviršių dydžio dažnio pasiskirstymus, neatstovauja nei vieno iš tų paviršių. Šios grafiko dalies krypties koeficientas sumažėjęs, nes po paviršiaus užklojimo laiko, tuos diametrus atitinkančių kraterių dar nespėjo susiformuoti pakankamai, kad jų dažnis darytų matomą įtaką palyginus su seno paviršiaus kraterių dažniu. Taigi, prie tų kraterių skersmenų (x ašis), dažnis yra nulemiamas beveik vien iš senesnio paviršiaus kraterių, nes vyksta sumavimas pratrintų kraterių iš vidurinės grafiko dalies su visais senesniais krateriais, kurie nebuvo nutrinti:

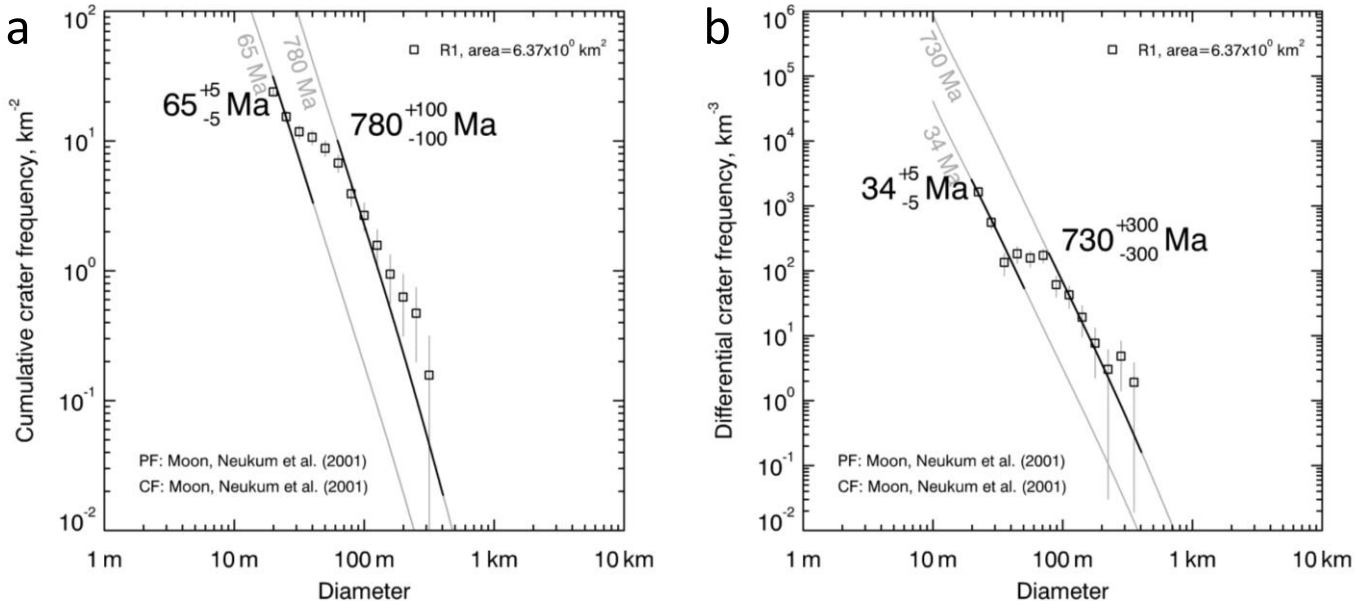
$$N_{v\ kumul} = N_v + N_{senas\ kumul} \ , o\ kadangi \ \ N_v \ll N_{senas\ kumul} \ \ , tai \ \ \ N_{v\ kumul} \sim N_{senas\ kumul} \ [4]$$

N_v - kraterių dažnis, kurį duoda tik tašką v (iš vidurinės taškų eigos zonos) atitinkantys kraterių diametrai D. $N_{senas\ kumul}$ - taško iš dešinės kumuliatyvinis kraterių dažnis, $N_{v\ kumul}$ - taško v ir taško iš dešinės suminis kumuliatyvinis tankis, kuris yra naudojamas kumuliatyviame CSFD grafike.

Tuo tarpu diferencialinio vaizdavimo atveju skirtingo amžiaus paviršius atitinkantys taškai atskiriami šuoliškai į juos atitinkančias izochronas. Dėl to, jauną ir seną paviršius atitinkančios grafiko dalys taip pat atsiskiria į atskiras izochronas (6 pav., b). Taigi, nustatinėjant abiejų šių paviršių amžius, galima paimti daugiau taškų ir tiksliau nustatyti tuos amžius (Michael, 2013). Laikui einant, vidurinės

[4] http://www.geo.fu-berlin.de/en/geol/fachrichtungen/planet/software

grafiko dalies krypties koeficientas pamažu statėja, nes atsiranda daugiau vidurinę grafiko dalį atitinkančių kraterių, kurių įtaka taško padėčiai diagramoje pasidaro palyginama su didesnių kraterių, kurie nebuvo nutrinti, įtaka.



6 pav. CSFD atvaizdavimas (a) kumuliatyviai, (b) diferencialiai. Dvi atskiros taškų sekos rodo, kad šiame plote yra persikloję dviejų skirtingų amžių paviršiai. Kumuliatyviniame vaizdavime esantys užlinkę taškai (tarp dviejų izochronų) iškraipo tikrąjį jaunesniojo paviršiaus amžių.

R-tipo CSFD vaizdavimas yra apibrėžiamas kaip [5] funkcija (Arvidson et al., 1978). Čia G(D) - diferencialinis CSFD vaizdavimas.

$$R(D) = \frac{G(D)}{D^{-3}} \qquad [5]$$

, kur D - kraterių skersmuo, G(D) - kraterių tankis diferencialiam vaizdavime, R - kraterių tankis reliatyviam vaizdavime.

Normavimas buvo parinktas į D^{-3} , nes nustatyta, kad didelių kraterių populiacijos Mėnulyje bei kitose planetose vidutiniškai išsidėsto pagal dėsningumą: $G(D) \sim D^{-3\pm1}$. Šio pasirinkimo dėka gaunamas vaizdavimas, kur jautriai reaguoja į nukrypimus nuo diferencialinio vaizdavimo, paklūstančio D^{-3} dėsniui (jeigu populiacija yra išsidėsčiusi lygiai pagal D^{-3}, duomenys grafike bus išsidėstę horizontaliai) (Neukum, 1984).

Dirbant su diferencialiniu vaizdavimu yra svarbu pasirinkti tinkamus intervalus. Remiantis Michael (2013) straipsniu buvo pasirinkti jo rekomenduojami intervalai paklūstantys taisyklei:

$$intervalas\ nuo\ 10^{1+0,1(n-1)}\ iki\ 10^{1+0,1n} \quad ,kur\ n = 1, 2, 3, \ldots \quad [6]$$

Kadangi taškų tankumas naudojant šį intervalą buvo optimalus, kiti intervalų variantai diferencialiniame vaizdavime imti nebuvo.

Iš turimų CSFD matavimo grafike taškų reikia atsirinkti tuos, prie kurių bus pritaikoma izochrona. Taškai turi būti parinkti taip, kad geriausiai atitiktų per juos brėžiamą izochroną, arba bent jau paklaidų ribose pakliūtų į izochroną. Paprastai tai pasireiškia, kai sutampa taškų sekos ir per juos brėžiamos izochronos krypties koeficientai. Kadangi pusiausvyros linija išvesta tik per vidurkį, vengti reikia tik taškų smarkiai pakilusių virš tos linijos, nepatenkančių ant jos net paklaidų ribose. Tačiau jeigu daugumos taškų seka yra išsidėsčiusi ant pusiausvyros funkcijos, arba žemiau jos, bet su krypties koeficientu kaip pusiausvyros funkcija, galima įtarti, kad tas paviršius yra pusiausvyroje, bet trynimo procesai ant jo yra silpnesni negu vidurkis. Šiame darbe naudojama standartinė Mėnulio pusiausvyros funkcija [7] (Trask, 1966):

$$F_{kum} = 10^{-1.1} D^{-2} \qquad ,D\ \ išreikštas\ [km] \qquad [7]$$

Craterstats2 kiekvienam intervalui atskirai paklaidas skaičiuoja pagal [8] formulę. Čia F - kraterių dažnis, ΔF statistinė kraterių dažnio paklaida, o N - kraterių skaičius.

$$\Delta F = \frac{F}{\sqrt{N}} \qquad [8]$$

Amžiaus paklaidos skaičiuojamos remiantis idėja, kad meteoritų kritimas yra nepriklausomas įvykis (jei per tam tikrą laiką nukrito daugiau meteoritų negu vidurkis, tai nereiškia, kad per sekantį dar vieną tokį laiko intervalą jų dėl to nukris mažiau), aprašomas Puasono skirstiniu [9] (Michael, 2010).

$$p = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \qquad [9]$$

Čia λ - tai meteoritų smūgių į paviršių skaičius, kurio būtų tikimasi per laiko intervalą t (tiriamo paviršiaus amžių). Amžius t nustatomas derinant izochroną prie taškų mažiausių kvadratų metodu. k -

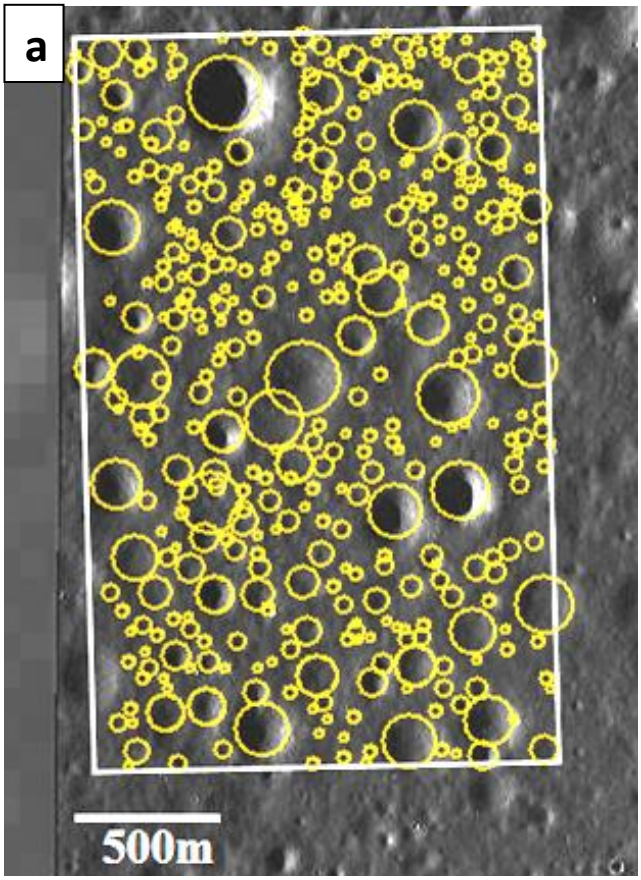
išmatuotas kraterių skaičius ant tiriamo paviršiaus, atitinkantis labiausiai tikėtiną λ vertę. Tačiau [9] lygtis rodo tikimybę, kad λ gali turėti bet kokią kitą vertę, negu labiausiai tikėtina - kitaip tariant, rodo tikimybę, kad kraterių skaičius yra kitoks negu būtų tikimasi prie tikrojo paviršiaus amžiaus t'.

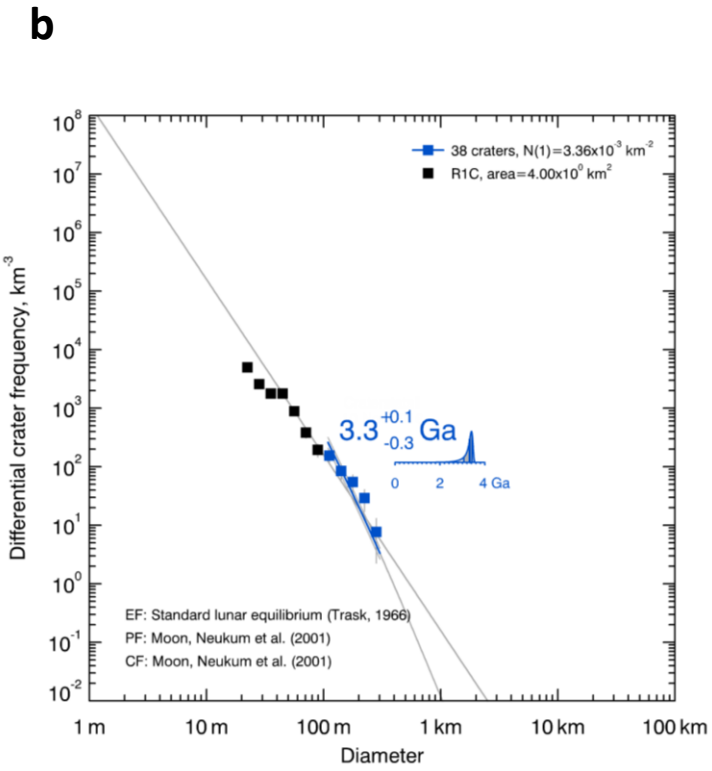
λ kitimas yra tiesiogiai susijęs su $N_{cum}(1)$ (1 km skersmens kraterių dažniu) kitimu, iš kurio per Mėnulio chronologinę funkciją [3] (2 pav.), gaunami paviršiaus amžiai. Craterstats2 turi savyje integruotą, į visą tai atsižvelgiančią funkciją, kuri sieja tikimybės tankį su amžiumi t' per matavimų būdu gaunamus parametrus k ir $N_{cum}(1)$. Grafikuose atvaizduojamas paklaidų skaičius atitinka 1σ intervalą. Paklaidos prie didelių amžių gaunasi nesimetriškos, nes prie tų amžių stipriai pasireiškia chronologinės funkcijos eksponentinė dalis.

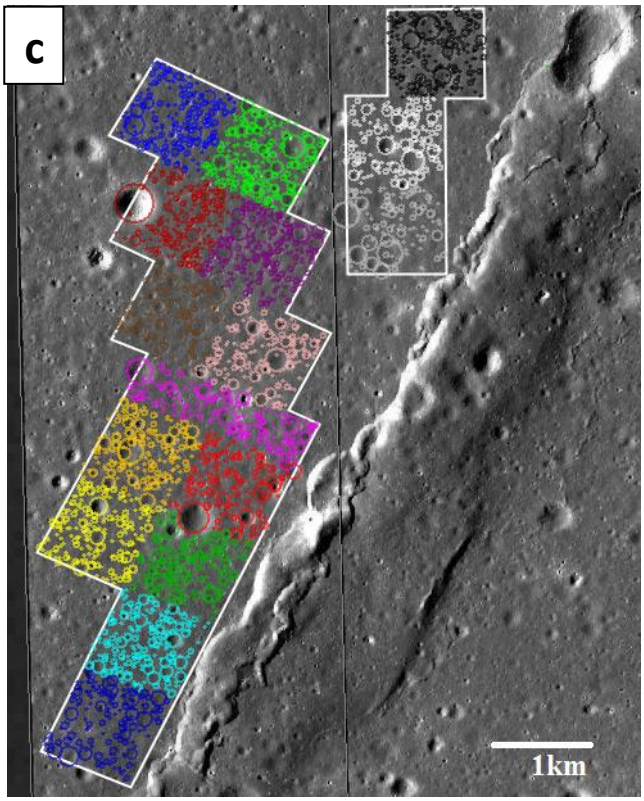
4. Rezultatai

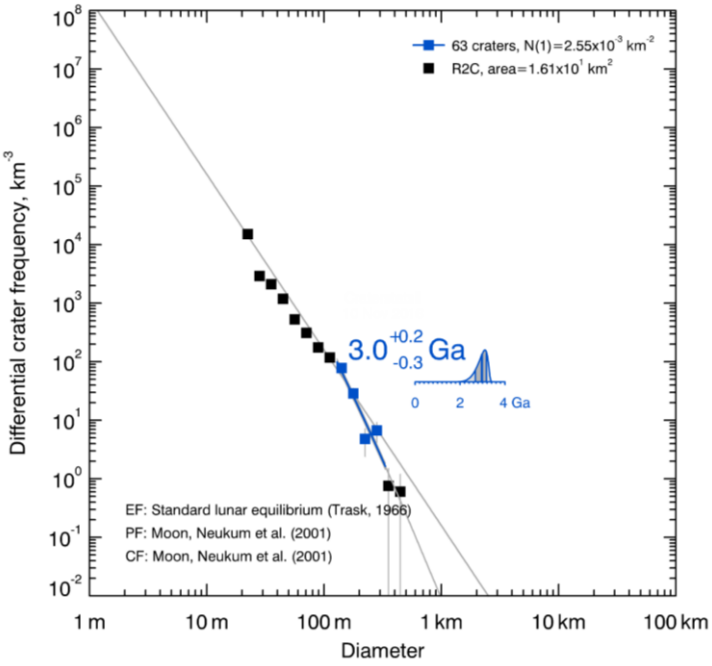
4.1 Kontrolinių paviršių amžiai

Amžiai nustatinėti imant taškus D > 100 m. Tirto kontrolinio plotelio su sužymėtais krateriais vaizdas ir CSFD duomenys visoms raukšlėms atvaizduoti 7 ir 8 paveikslėliuose. Paviršių amžių nustatymo duomenys pateikti lentelėje 2.

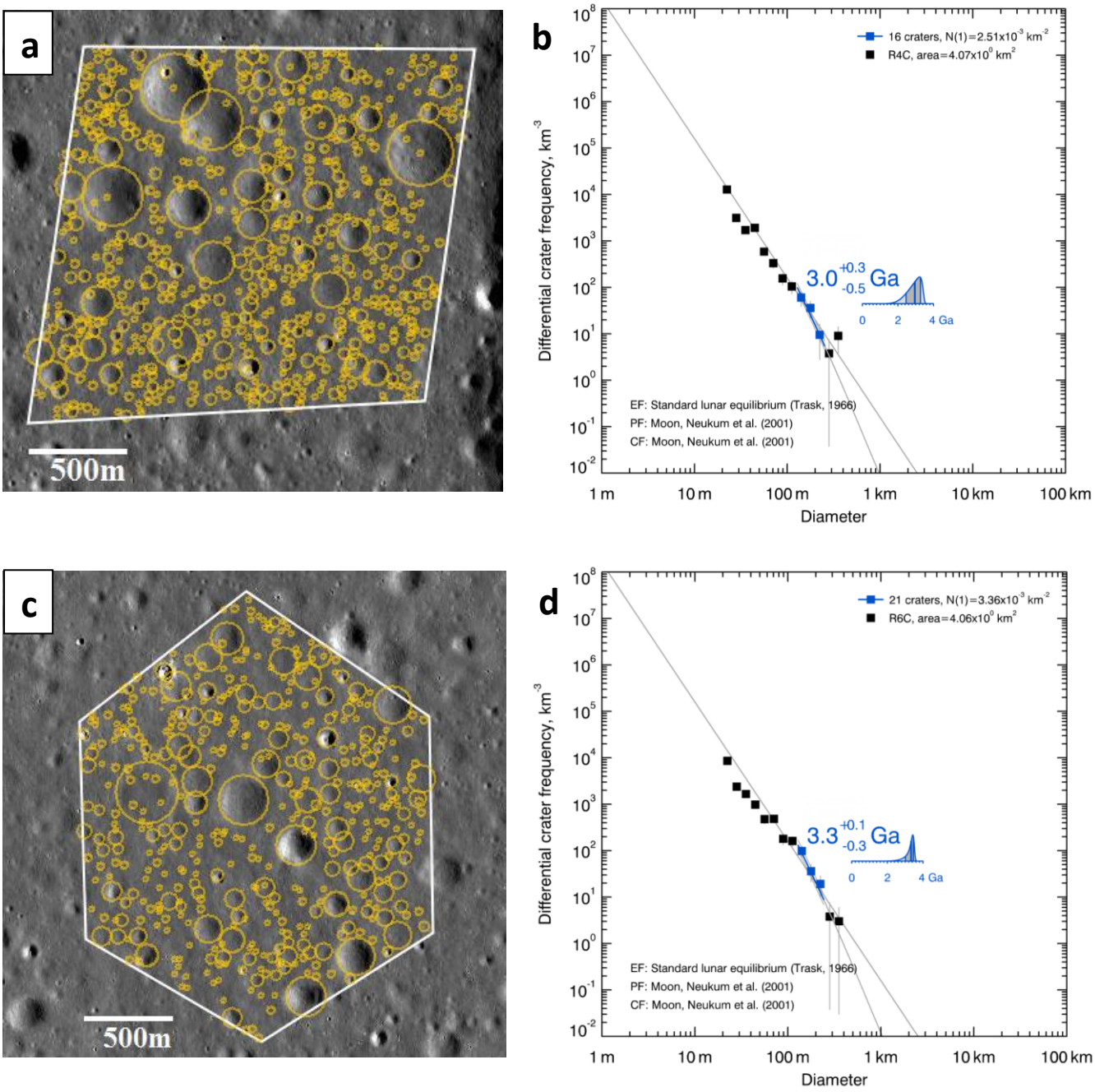








7 pav. a - raukšlės 1 kontrolinis paviršius (R1C), b - R1C amžius, c - raukšlės 2 kontrolinis paviršius (RC2), d - RC2 amžius. Paskutiniai taškai neimti, nes juose yra tik vienas krateris ir jie yra statistiškai nepatikimi.



8 pav. a - raukšlės 4 kontrolinis paviršius (R4C), b - R4C amžius, c - raukšlės 6 kontrolinis paviršius (RC6), d - RC6 amžius. Paskutiniai taškai neimti, nes juose yra tik vienas krateris ir jie yra statistiškai nepatikimi.

Lentelė 2. Kontrolinių paviršių amžiai, plotai, koordinatės ir suregistruotų kraterių skaičius.

Tiriamas paviršius	Centro koordinatės	Plotas, km^2	Amžius, Ga	Kraterių skaičius
RC1	322,78ºE -26,80ºN	4	3,3 +0,1/-0,3	432
RC2	324,56ºE -25,83ºN	16,1	3,0 +0,2/-0,3	2409
RC4	325,33ºE -24,68ºN	4,07	3,0 +0,3/-0,5	586
RC6	324,20ºE -23,92ºN	4,06	3,3 +0,1/-0,3	455

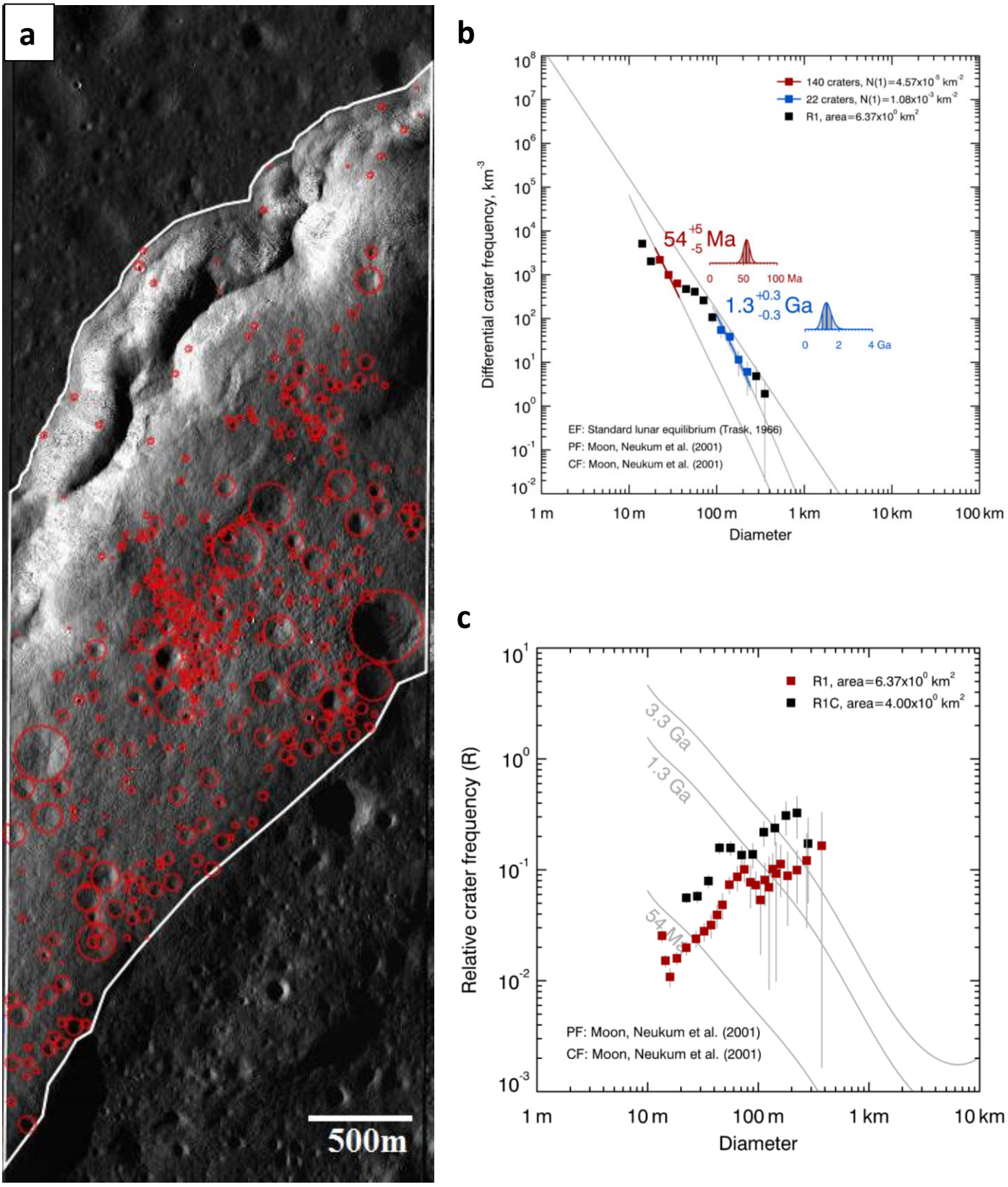
Kontrolinių paviršių amžiai kinta nuo 3 iki 3,3 Ga. Šių plotų amžiai yra artimi juos atitinkančių Mare Humorum dalių, tirtų Hiesinger et al. (2000) straipsnyje, nustatytiems amžiams (~3,6 Ga raukšlių 1, 2, 6 regionams ir ~3,3 Ga raukšės 4 regionui). Šio darbo ir Hiesinger gautų amžių nesutapimai gali būti paaiškinami skirtingomis naudotomis kraterių imtimis, nes Hiesinger et al. (2000) tyrime skaičiuoti krateriai nuo D > 800 m, kai tuo tarpu šiame darbe geriausiu atveju buvo naudoti krateriai D < 500 m.

4.2 Raukšlių amžiai

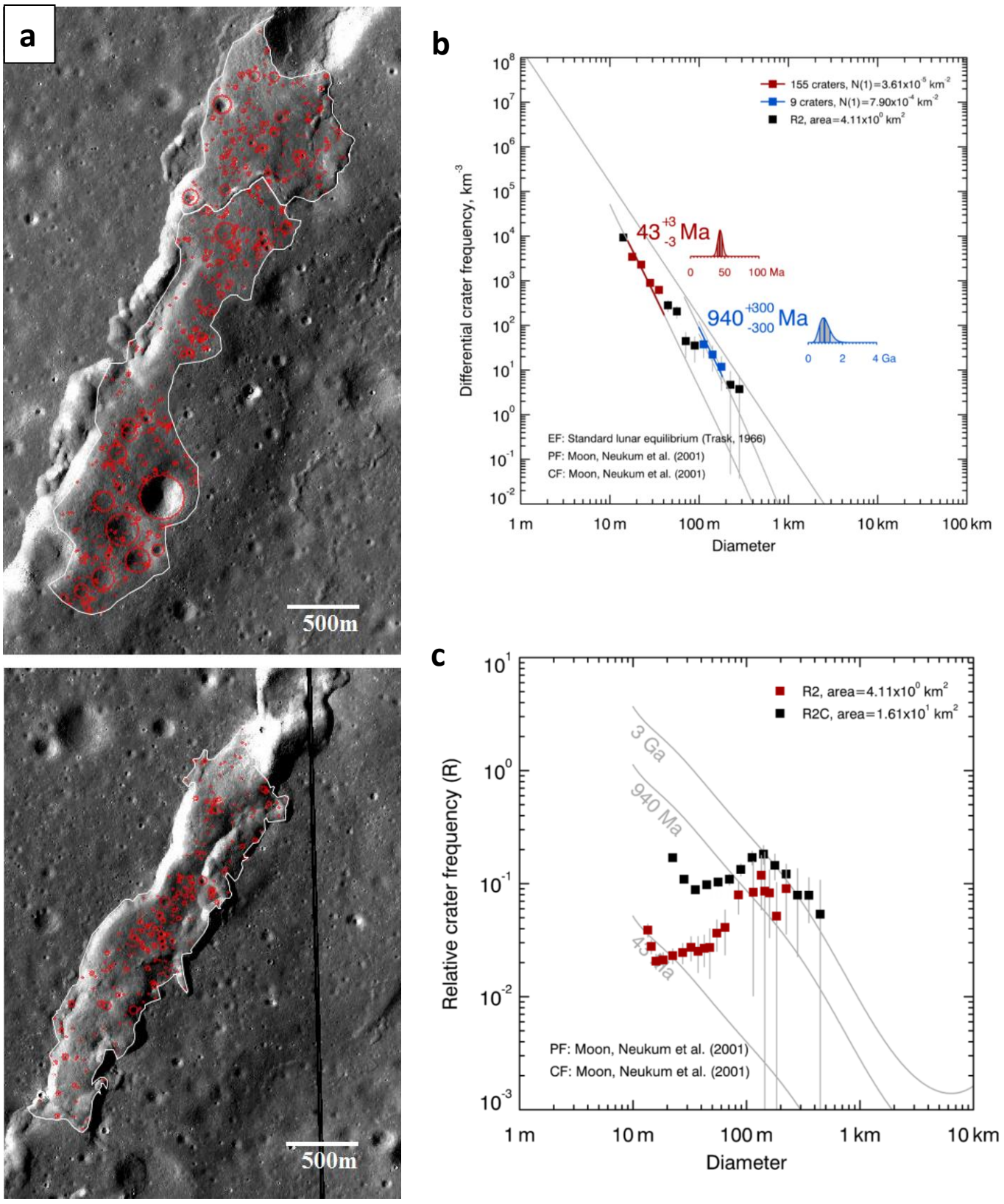
Visoms raukšlėms buvo paimtos dvi taškų imtys - viena jaunesniam paviršiui, kita pamatiniam (senesniam) paviršiui. CSFD duomenys visoms raukšlėms atvaizduoti 9 - 12 paveikslėliuose kartu su plotelio, kuriame buvo žymimi krateriai vaizdu. Taip pat atidėtos R-tipo, suglotnintos CSFD raukšlei ir kontroliniam paviršiui. R-tipo grafikuose buvo naudotas „pseudo-log“ taškų grupavimas į intervalus: 13, 14, 15, 17, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 170, 200, ir taip toliau (metrais). Toks taškų grupavimas buvo parinktas, norint detaliau pamatyti kreivės vingiavimus, o tam reikia smulkesnio taškų grupavimo žingsnio. Paviršių amžių nustatymo duomenys pateikti lentelėje 3.

Lentelė 3. Raukšlių tiriamame regione amžiai, plotai ir koordinatės ir kraterių skaičius.

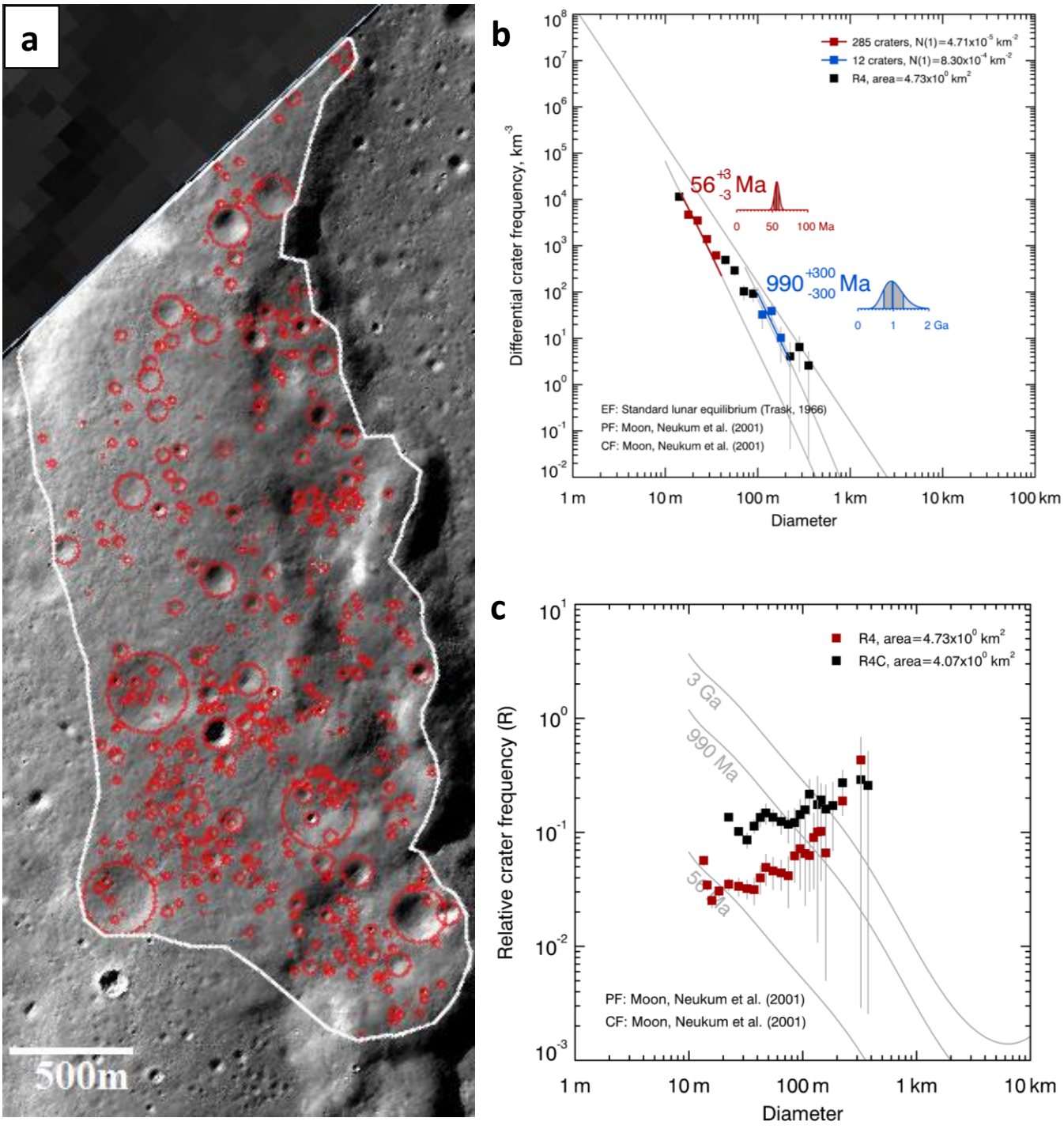
Tiriamas paviršius	Centro koordinatės	Plotas, km^2	Jaunesnis amžius, Ma	Senesnis amžius, Ga	Kraterių skaičius
Raukšlė 1	324,27ºE -23,53ºN	6,37	54 ± 5	1,3 ± 0,3	436
Raukšlė 2	323,31ºE -24,20ºN	4,11	43 ± 3	0,94 ± 0,3	317
Raukšlė 4	325,32ºE -24,90ºN	4,73	56 ± 3	0,99 ± 0,3	496
Raukšlė 6	322,78ºE -26,97ºN	4,07	43 ± 4	0,73 ± 0,2	330



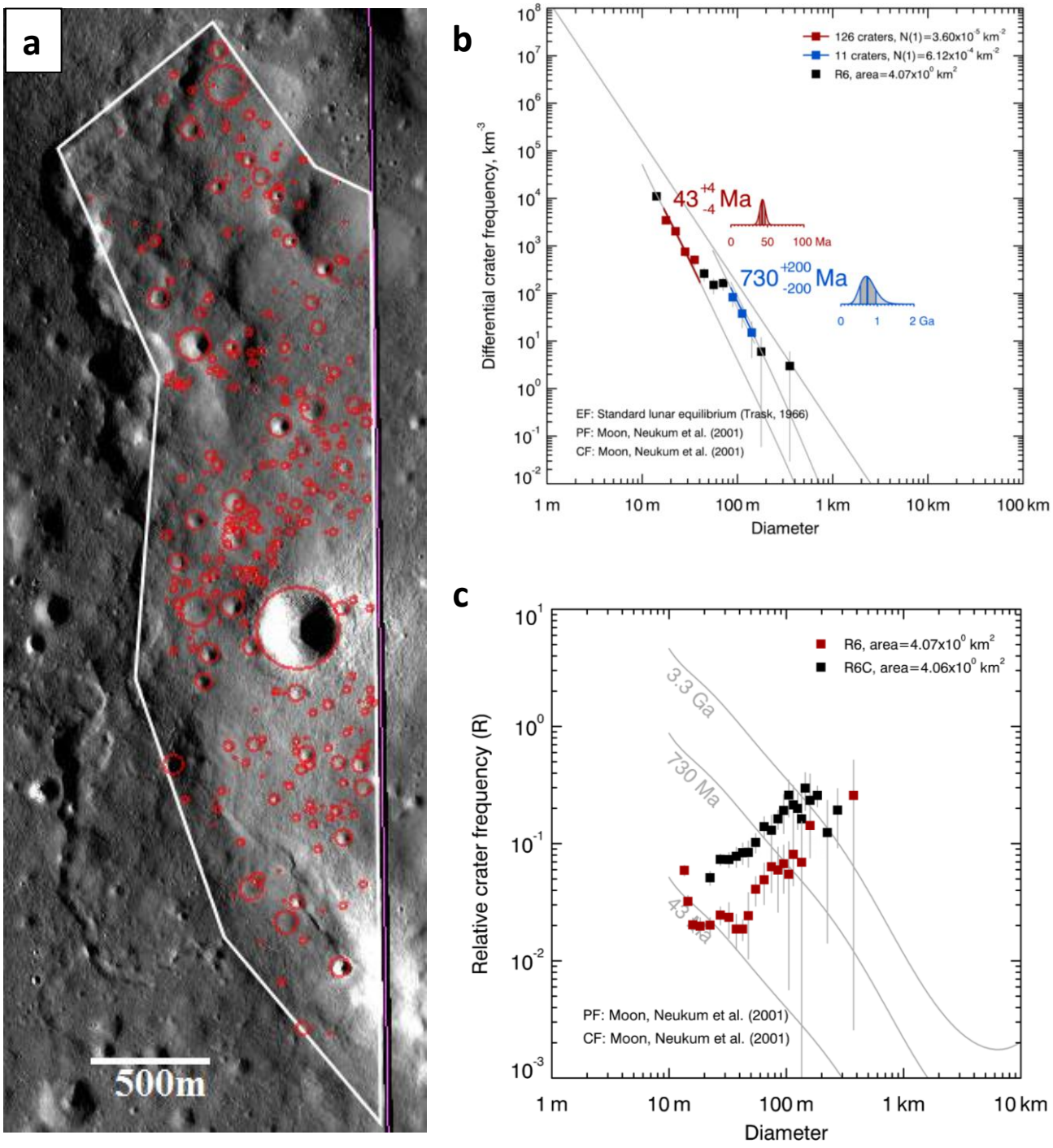
9 pav. a - raukšlės 1 matuojama zona, b - diferencialinis CSFD grafikas su nustatytais amžiais, c - R-tipo CSFD raukšlei (R1) ir jos kontroliniam paviršiui (R1C). Jaunojo amžiaus pirmieji taškai neimti, nes ten tuos diametrus smarkiai paveikę antriniai krateriai. Seno paviršiaus amžiaus prieš paskutinis taškas neimtas, nes jis patenka ant kitos izochronos. Paskutinis taškas atmestas dėl statistinio nepatikimumo - jame tik vienas krateris.



10 pav. a - raukšlės 2 matuojama zona, b - diferencialinis CSFD grafikas su nustatytais amžiais, c - R-tipo CSFD raukšlei (R2) ir jos kontroliniam paviršiui (R2C). Jaunojo amžiaus pirmieji taškai neimti, nes ten tuos diametrus smarkiai paveikę antriniai krateriai. Paskutiniai taškai atmesti dėl statistinio nepatikimumo - juose tik po vieną kraterį.



11 pav. a - raukšlės 4 matuojama zona, b - diferencialinis CSFD grafikas su nustatytais amžiais, c - R-tipo CSFD raukšlei (R4) ir jos kontroliniam paviršiui (R4C). Jaunojo amžiaus pirmieji taškai neimti, nes ten tuos diametrus smarkiai paveikę antriniai krateriai. Paskutiniai taškai atmesti dėl statistinio nepatikimumo - juose tik po vieną kraterį. Taškas tarp jų atmestas, nes yra ant kitos izochronos.



12 pav. a - raukšlės 6 matuojama zona, b - diferencialinis CSFD grafikas su nustatytais amžiais, c - R-tipo CSFD raukšlei (R6) ir jos kontroliniam paviršiui (RC6). Jaunojo amžiaus pirmieji taškai neimti, nes ten tuos diametrus smarkiai paveikę antriniai krateriai. Paskutiniai taškai atmesti dėl statistinio nepatikimumo - juose tik po vieną kraterį.

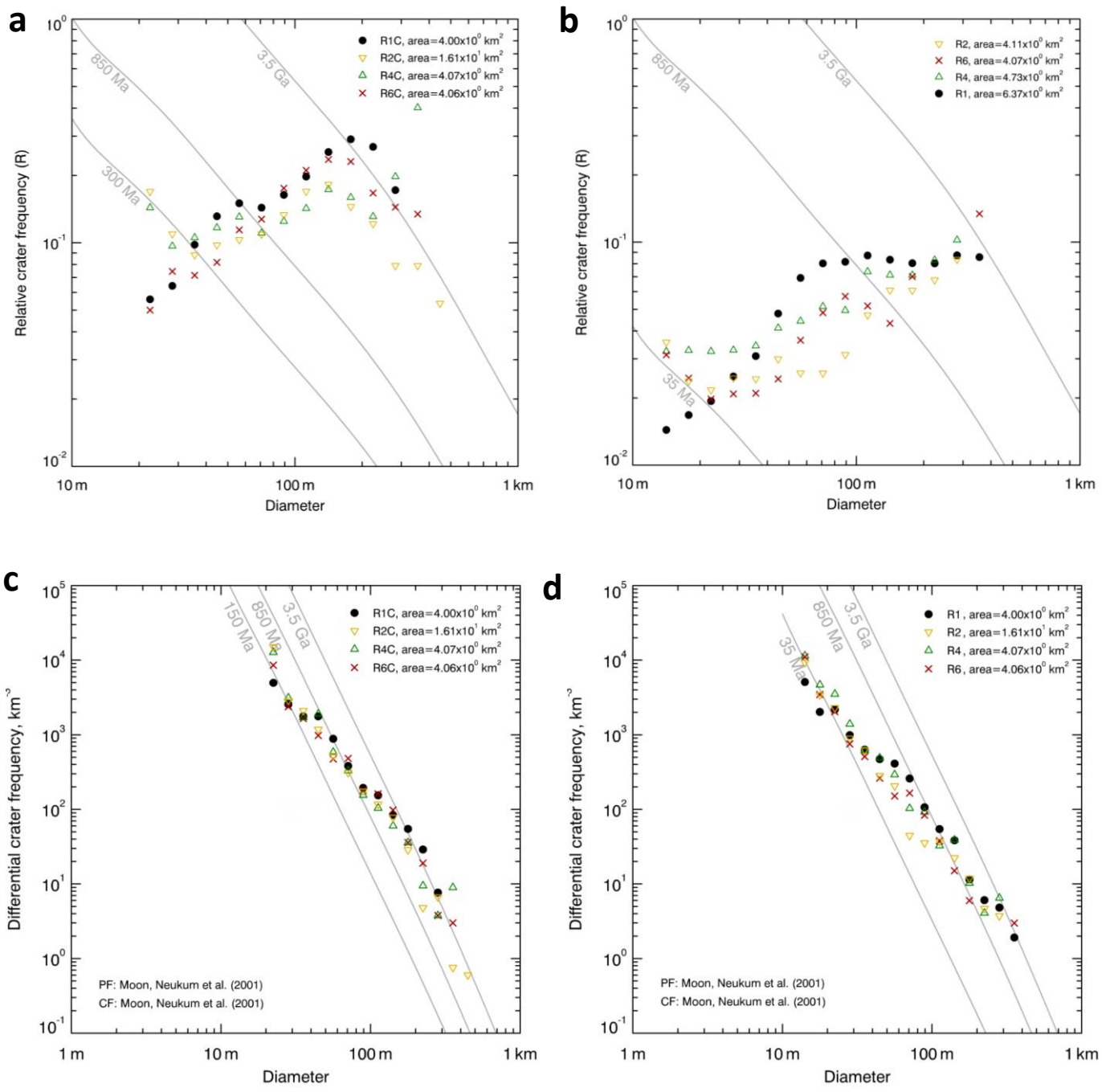
Matyti, kad jaunesnių paviršių amžiai yra išsidėstę nuo 43 Ma iki 56 Ma. Visoms raukšlėms buvo galima gauti šiek tiek mažesnius amžius paimant pirmą tašką (10 per dekadą). Tai atitinka pirmus tris, jei žiūrint pagal psiaudo-log taškų surūšiavimą į intervalus (9-12 pav. c). Visoms raukšlės pirmi trys psiaudo-log taškai kyla stačiu kampu. Tai parodo smarkią antrinių kraterių įtaką. Todėl šiuos taškus atitinkantis taškas 10 per dekadą intervaluose buvo atmestas.

Senesnių paviršių amžiai išsibarstę nuo 0,73 iki 1,3 Ga. Pasirenkant taškus amžiaus nustatymui, didžiausius diametrus atitinkantys buvo atmesti, nes į tuos intervalus buvo pakliuvę tik po vieną kraterį. Pagal [8] formulę gaunama, kad tokiam taškui paklaidos yra ±100% jo vertės, todėl toks taškas yra statistiškai nepatikimas.

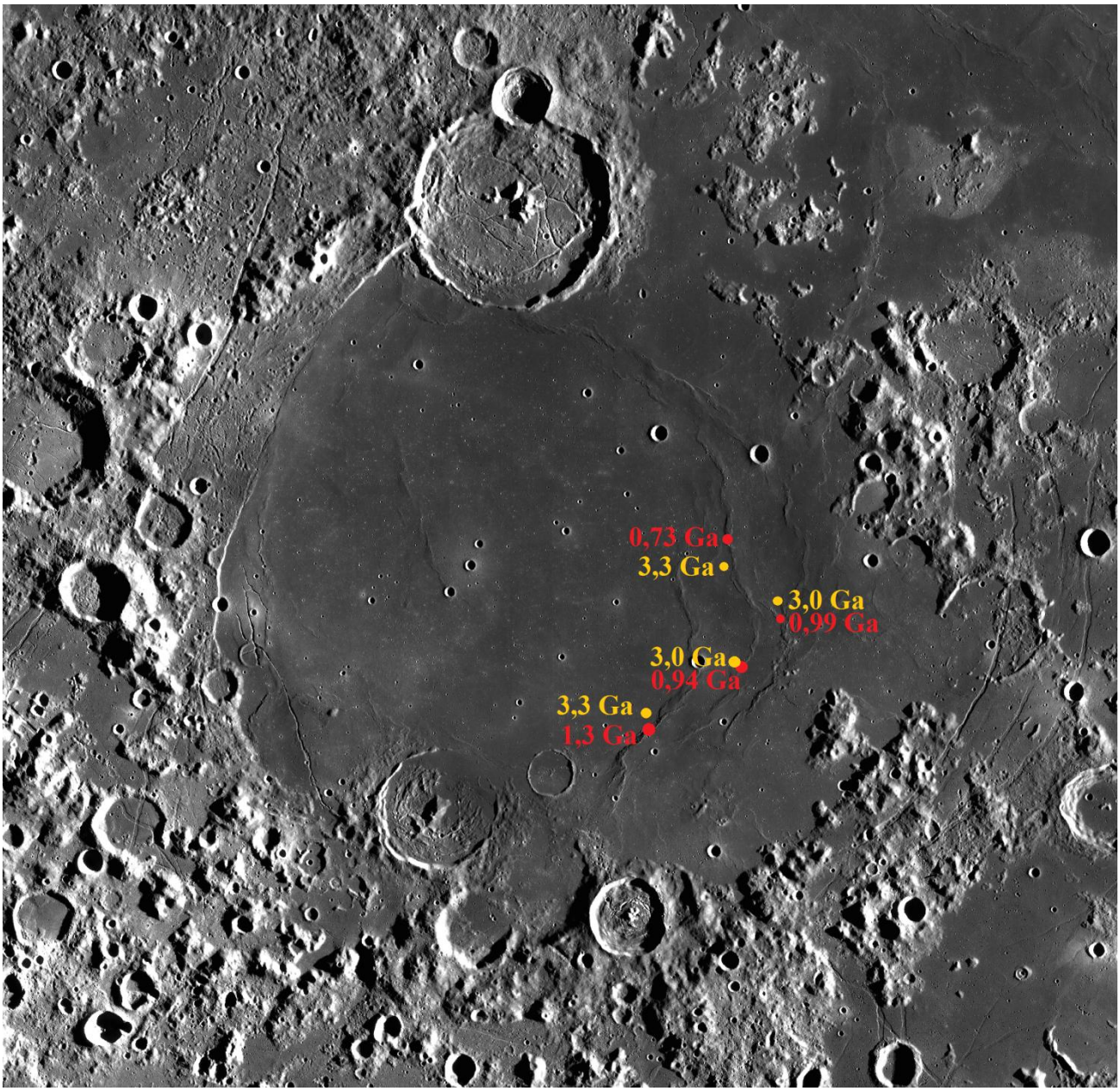
4.3 Palyginamieji CSFD grafikai

Raukšlių (13 pav. a) ir kontrolinių paviršių (13 pav. b) CSFD sudėtos į vieną grafiką atskirai raukšlėms ir kontroliniams paviršiams. Čia naudotas „10 per dekadą“ taškų sugrupavimas su suglotninimu, siekiant atskiras taškų sekas padaryti išskiriamas viena nuo kitos. Atskirų taškų paklaidos nerodomos dėl tos pačios priežasties.

Taip pat padaryti ir tokie patys diferencialiniai CSFD grafikai (13 pav. c ir d). Naudotas „10 per dekadą“ taškų sugrupavimas , o atskirų taškų paklaidos nerodomos, kad geriau matytųsi atskiros CSFD - šie grafikai reikalingi tik tam, kad būtų galima palyginti taškų sekų eigą tarp tiriamų paviršių.



13 pav. a - kontrolinių paviršių R-tipo CSFD grafikas. b - raukšlių R-tipo CSFD grafikas. c - kontrolinių paviršių diferencialinis CSFD grafikas. d - raukšlių diferencialinis CSFD grafikas. Pilkos linijos - izochronos einančios per skirtingo amžiaus paviršių CSFD dalis.



14 pav. Mare Humorum (Drėgmės jūros) vakarinėje dalyje esančio raukšlėto regiono raukšlių ir kontrolinių paviršių šiame darbe gauti amžiai. Raudonai pažymėti raukšlių tirti plotai ir jų amžiai, o oranžine spalva pažymėti šalia raukšlių esantys kontroliniai paviršiai bei juo atitinkantys amžiai.

5. Rezultatų aptarimas

5.1 Kontroliniai paviršiai

Iš 13 pav. a matyti, kad kontrolinių paviršių R-tipo CSFD taškų eigos yra panašios kraterių diametrų intervale D > 60 m. Tai rodo, kad šiuos paviršius veikė tokie patys globalūs procesai apimantys tiek kraterių kūrimą, tiek ardymą. Neigiamas polinkio kampas intervale D > ~130 m rodo, kad didžiausi krateriai vis dar yra produkcijoje. Visų paviršių taškų sekos turi bendrą tendenciją mažėti intervale D < ~130 m - susidaro teigiamas polinkio kampas rodantis, kad krateriai buvo greičiau naikinami negu kuriami. Tai parodo, kad praeityje būta stiprių kraterių valymo procesų. Krateriai D ~200 m yra perlipę pusiausvyros liniją (7, 8 pav. b), tačiau horizontalumas R-tipo grafikuose, rodantis pusiausvyrą nepasireiškia. Tai rodo, kad nesusiję su tektonika kraterių naikinimo procesai vyksta lėčiau negu [7] formule aprašomas vidurkis. Nukrypimai pasireiškia raukšlių 2 ir 4 kontroliniams paviršiams intervale D < 30 m. Taškai šiame intervale yra smarkiai pakilę ir sudaro gana statų polinkio kampą, rodantį sparčią produkciją. Tokios produkcijos priežastis, greičiausiai, bus antriniai krateriai. Tai rodo, kad amžių nustatymas per mažesnius kraterius duos didesnį amžių negu koks turėtų būti. 13 pav. c atvaizduotos trys izochronos, atspindinčios kontrolinių taškų CSFD taškų išsidėstymą. Didžiausių diametrų D > ~100 m krateriai yra išsibarstę apie 3,5 Ga izochroną, daugmaž atitinkančią Mare Humorum amžių. Iš didesnio taškų kiekio ant 3,5 Ga izochronos galima spręsti, kad šių skersmenų krateriai buvo mažai paveikti greta vykusio raukšlėjimosi proceso.

5.2 Raukšlių paviršiai

13 pav. b atidėtos raukšlių R-tipo CSFD taškų sekos turi vidutiniškai tendenciją per visus diametrus mažėti, sudarydamos teigiamą polinkio kampą, kuris rodo spartų kraterių nykimą. Taip pat išryškėja, kad Raukšlė 1 buvo mažiausiai paveikta mažesnių antrinių kraterių. Visos raukšlės turi taškų eigos išsikišimą aukštyn ties didesniais skersmenimis, kurio detalumas matosi 9-12 pav. c grafikuose, tačiau geriausiai matosi 11 pav. c. Juose matyti, kad didesnių kraterių intervale ~100 m < D < ~200 m yra neigiamas polinkio kampas rodantis produkciją, o jam iš šonų yra statūs teigiami polinkio kampai, rodantys stiprų kraterių valymą. Polinkio kampas tam intervalui iš dešinės paaiškinamas raukšlės susiformavimu. Formuojantis raukšlei, mažesni krateriai buvo nutrinti, o nuo tam tikro diametro smarkiai suardyti (13 pav. c ir d) (taškų skaičius ant 3,5 Ga izochronos sumažėjęs). Tai efektyviai padidino susikaupusių didesnių kraterių nykimo spartą. Polinkio kampai iš kairės ir dešinės yra panašūs. Tai rodo, kad kraterių nuvalymo sparta yra panaši kaip ir tada kai vyko raukšlės susiformavimas. Iš šito galima

spręsti, kad kažkada nesenai vyko dar vienas raukšlėjimosi etapas, nutrynęs mažesnius kraterius. Gali būti, kad tai vyko ties amžiumi prilyginamu nustatytiems „jauniems“ raukšlių amžiams ~50 Ma. Tačiau to užtikrintai pasakyti negalima, nes šis jaunas amžius taip pat gali rodyti ir, tiesiog, mažesnių kraterių išsilaikymo iki išnykimo trukmę. Taip pat galima pastebėti iš 13 pav. d, kad raukšlėms pagrindiniai taškai išsidėstę ties ~850 Ma izochroną, kai tuo tarpu kontrolinių paviršių ties ~3,5 Ga (13 pav. c).

5.3 Raukšlių susiformavimo amžius

Darbe nustatyti raukšlių ir kontrolinių paviršių amžiai apibendrinti 14 pav. Iš jo ir iš lentelių 2 ir 3 matosi, kad amžius tarp raukšlės senesnio paviršiaus ir šalia jos esančio kontrolinio paviršiaus skiriasi nuo ~2 iki ~4 kartų, ir nesutampa net paklaidų ribose, imant 2σ paklaidų intervalą. Tai leidžia užtikrintai teigti, kad raukšlė susiformavimo amžius ir ją supančio paviršiaus amžius skiriasi. Tas gana gerai iliustruojama R-tipo grafikuose 9-12 pav. c, kur matyti, kad ant raukšlės esančių kraterių tankiai yra gerokai mažesni negu ant greta esančio paviršiaus. Tam tikrų nustatytų amžių paklaidos yra santykinai nemažos, nes nustatinėjant amžių, izochronos derinime naudojamų kraterių D > 100 m buvo nedaug. Taip yra dėl tiriamo ploto apribojimų.

6. Išvados

Šiame darbe gauta, kad:

- Mažesnio negu 100 m skersmens krateriai yra stipriau paveikti naikinimo procesų negu likę krateriai, o krateriai didesni negu 250 m yra beveik nepaveikti. Todėl remiantis didesniais krateriais gauti modeliniai amžiai labiau atitinka tikrąjį paviršių amžių. Kraterių populiacijų aiškiai esančių pusiausvyroje būsenoje neaptikta.
- Raukšlių paviršių tiriamame regione modeliniai amžiai yra apie 1 Ga, o šalia raukšlių esančių kontrolinių paviršių ~2-3 kartus didesni.
- Iš to seka, kad raukšlės šioje srityje formavosi ~2 milijardus metų ir jų formavimasis baigėsi prieš ~1 Ga.
- Nustatytas raukšlių amžius patvirtina jų vėlesnio, lyginant su pačia jūra, susiformavimo hipotezę.

Literatūra

Arvidson, R., Boyce, J., Chapman, C., Cintala M., Fulchignoni, M., Moore H., Neukum, G., Schultz, P., Soderblom, L., Strom, R., Woronow, A. and Young, R., *Standard techniques for presentation and analysis of crater size-frequency data*. Icarus -- 37, 467 - 474 (1978)

Barboni, M., Boehnke, P., Keller, B.b Kohl, I. E., Schoene, B. Young, E. D., McKeegan, K. D., *Early formation of the Moon 4.51 billion years ago*, Sci Adv. 11;3(1):e1602365. doi:10.1126/sciadv.1602365. (2017)

Braden, S. E., Stopar, J. D., Robinson, M. S., Lawrence, S. J., van der Bogert, C. H., Hiesinger, H., *Evidence for basaltic volcanism on the Moon within the past 100 million years*, Nature Geoscience, 7:787–791 (2014)

Fassett, C. I., and B. J. Thomson, *Crater degradation on the lunar maria: Topographic diffusion and the rate of erosion on the Moon*, J. Geophys. Res. Planets, 119, 2255–2271,doi:10.1002/2014JE004698 (2014)

Hartmann, W.K., Gaskell, R. W., *Planetary cratering 2: Studies of saturation equilibrium*, Meteoritics and Planetary Science, 32: 109–121 (1997)

Hartmann, W.K., *Martian cratering. 9. Toward resolution of the controversy about small craters*, Icarus 189, 274–278 (2007)

Hiesinger, H., Jaumann, R., Neukum, G. and Head, J. W., *Ages of mare basalts on the lunar nearside*, Journal of Geophysics Research, Vol. 105, NO. E12, Pages 29, 239-29,275. (2000)

Michael, G., Neukum, G., *Planetary surface dating from crater size-frequency distribution measurements:differential forms of production function polynomials*, 41st Lunar and Planetary Science Conference, Berlin, Germany (2010)

Michael, G.G., *Planetary surface dating from Crater size-frequency distribution measurements: Differential presentation of Data for Resurfaced units*, 44th Lunar and Planetary Science Conference, abstract #2330 (2013)

Neukum, G., Ivanov, B. A., and Hartmann, W. K. *Cratering records in the inner solar system in relation to the lunar reference system*. Space Science Reviews, 96:55–86 (2001)

Neukum, G., *Meteorite bombardment and Dating of Planetary surfaces*, National Aeronautics and Space Administration, Washington (1984)

Ronca, L. B., *A Geological Model of Mare Humorum*, Icarus 4, 390-395 (1965)

Schultz, P. H., Spudis, P. D., *Beginning and end of lunar mare volcanism*, Nature, 302:233–236 (1983)

Trask, N. J., *Size and spatial distribution of craters estimated from Ranger photographs*. Jet Propul. Lab. Tech. Rep., 32(800):252–263. (1966)

van der Bogert, C. H., Michael, G. G., Kneissl, T., Hiesinger, H., Pasckert, J. H., *Development of guidelines for recommended lunar CSFD count area sizes via analysis of random CSFDs*, Workshop on Issus in Crater Studies and the Dating of Planetary Surfaces, abstract #9023 (2015)

Xiao, Z., Strom, R. G., *Problems determining relative and absolute ages using the small crater population*, Icarus, 220:254–267 (2012)

MĖNULIO MARE HUMORUM REGIONO RAUKŠLIŲ CHRONOLOGINIS TYRIMAS

Liudvikas Taluntis

Santrauka

2009 metais pradėjusio savo veiklą LRO (*Lunar Reconnaissance Orbiter*) palydovo darytų nuotraukų dėka buvo atrasta naujų mįslingų mėnulio paviršiaus struktūrų. Didesnės raiškos nuotraukų pagalba galima išskirti mažesnius kraterius, tai suteikia galimybę tirti smulkesnes Mėnulio paviršiaus struktūras. Šiame darbe atliekamas vienos tokių struktūrų susiformavimo amžiaus nustatymo tyrimas.

Darbo tikslas – nustatyti Mare Humorum (Drėgmės jūros) vakarinio pakraščio raukšlių susiformavimo amžių.

Darbo uždaviniai:

- surasti ir išmatuoti į tiriamus regionus patenkančius kraterius;
- nustatyti produkcijos, nykimo ir šių procesų pusiausvyroje esančių kraterių populiacijas;
- nustatyti raukšlėtų paviršių ir šalia esančių neraukšlėtų paviršių amžių.

Išvados:

- Mažesnio negu 100 m skersmens krateriai yra stipriau paveikti naikinimo procesų negu likę krateriai, o krateriai didesni negu 250 m yra beveik nepaveikti. Todėl remiantis didesniais krateriais gauti modeliniai amžiai labiau atitinka tikrąjį paviršių amžių. Kraterių populiacijų aiškiai esančių pusiausvyroje būsenoje neaptikta.
- Raukšlių paviršių tiriamame regione modeliniai amžiai yra apie 1 Ga, o šalia raukšlių esančių kontrolinių paviršių ~2-3 kartus didesni.
- Iš to seka, kad raukšlės šioje srityje formavosi ~2 milijardus amžių ir jų formavimasis baigėsi prieš ~1 Ga.
- Nustatytas raukšlių amžius patvirtina jų vėlesnio, lyginant su pačia jūra, susiformavimo hipotezę.

CHRONOLOGICAL STUDY OF MOON'S WRINKLE RIDGES IN MARE HUMORUM REGION

Liudvikas Taluntis

Summary

Because LRO (*Lunar Reconnaissance Orbiter*) spacecraft's provided better quality of photos, many enigmatic Moon surface structures were found. Better resolution of photos allows smaller craters to be identified. This enables the study of smaller Moon surface structures. In this work the formation age of one type of such structures - Moon's wrinkle ridges is measured.

Aim of the work - find the formation age of wrinkle ridges located in Mare Humorum western region.

Tasks:

- Find and measure craters belonging to studied regions.
- Determine crater populations that are in production, degradation and in equilibrium of these processes.
- Find the absolute ages of wrinkled and non-wrinkled adjacent surfaces.

Conclusions:

- Craters with smaller diameters than 100 m are more heavily affected by the processes of degradation than larger than 100 m. Craters with diameters of 250 m are barely affected. Model ages found using larger than ~100 m craters, better reflect true surface age. Crater populations that were clearly in equilibrium could not be found.
- Absolute ages of wrinkle ridges in studied region are approximately 1 Ga, while ages of nearby control surfaces are ~2-3 times greater.
- This suggests that wrinkle ridges in this region had been forming for ~ 2 billion years and their formation has ended ~1 Ga ago.
- Measured age of wrinkle ridges confirms their successive, compared to Mare Humorum, formation hypothesis.