



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

Gediminas Pranskūnas

**ELEKTROS ENERGIJOS GAMYBOS SAULĖS SISTEMOS KŪNŲ
PAVIRŠIUJE IR JŲ ORBITOSE TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
Doc. dr. Gytis Svinkūnas

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**ELEKTROS ENERGIJOS GAMYBOS SAULĖS SISTEMOS KŪNŲ
PAVIRŠIUJE IR JŲ ORBITOSE TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos sistemos (kodas 621H63005)

Vadovas

Doc. dr. Gytis Svinkūnas

Recenzentas

Lekt. dr. Povilas Norkevičius

Projektą atliko

Gediminas Pranskūnas

KAUNAS, 2017

Pranskūnas, Gediminas. Elektros energijos gamybos Saulės sistemos kūnų paviršiuje ir jų orbitose tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Gytis Svinkūnas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: *saulės šviesa, šviesos energija, optinė ekstinkcija, dirbtinis palydovas, Marsas, fotovoltinė sistema, radioizotopų energijos sistema, termoelektrinis generatorius.*

Kaunas, 2017. 120 p.

SANTRAUKA

Darbe atliekamų tyrimų objektai – Saulės ir jos sistemos kūnų orbitose skriejantys kosminiai zondai bei šių kūnų paviršiuje esantys savaeigiai ir stacionarūs aparatai. Šie tyrimai yra orientuoti į branduolines bei fotovoltines elektros energijos gamybos sistemas bei jų panaudojimą. Fotovoltinėmis energijos sistemomis išgautinos elektros energijos kiekio (tankio) analizei darbe skiriama daugiausiai dėmesio.

Darbo tema yra aktuali šalims, planuojančioms bei jau vykdančioms kosminius tyrimus ar komercinius, tokius kaip ryšio ar stebėjimo palydovų, užsakymus. Taip pat kompanijoms, vystančioms kosmoso turizmo (pvz. *Bigelow Aerospace*) ir pramonės (pvz. *Blue Origin*) planus bei žmonių išlaipinimo Marso planetoje (pvz. *NASA* ir *SpaceX*) idėjas.

Darbo metodinėje dalyje pateikiamas nuoseklus tiriamojoje dalyje naudojamų formulių išvedimas bei teiginių pagrindimas. Saulės sistemos kūnų judėjimui užrašyti ir formulėms, aprašančioms dienos bei (orbitinės) nakties trukmes, išvesti yra taikomas geocentrinis modelis. Atmosferinės (optinės) ekstinkcijos skaičiavimai paremti *HITRAN* spektrometrijos duomenų bazėje talpinamais duomenimis. Tyrimams atlikti naudojamos *MATLAB* ir *GAMS* matematinio modeliavimo platformos. Rezultatų tikslumui padidinti, kur tai yra įmanoma, skaičiavimai vykdomi penkių reikšminių skaičių tikslumu, o formulių išvedimuose vengiamos aproksimuojančios prielaidos. Darbo rezultatai pateikiami strategiškai svarbiems objektams, nuotoliams bei vietoms, o jiems geriau suprasti pateikiami rezultatų palyginimai.

Darbe pateikiama: Saulės energinės apšvietos priklausomybė nuo jos orbitoje skriejančio kūno ar kosminio aparato atstumo iki Saulės; energijos kiekio, išgautino tam tikrų Saulės sistemos kūnų paviršiuje, priklausomybė nuo geografinės platumos ir kūno padėties orbitoje aplink Saulę; orbitinės nakties priklausomybė nuo Saulės sistemos kūno orbitoje skriejančio bei šio kūno orbitinių parametrų; atmosferinės ekstinkcijos įtaka Žemės bei Marso planetų paviršių pasiekiančiai saulės šviesai; fotovoltinių ir radioizotopų energijos sistemų palyginimas; saulės šviesos energijos, pasiekiančios vietas, kuriose planuojama įrengti pirmąsias apgyvendintas Marso tyrimų stotis, analizė.

Pranskūnas, Gediminas. Research on Electric Power Generation in Orbits and on Surfaces of Celestial Bodies in Solar System: Master's thesis in Electrical Power Systems / supervisor assoc. prof. Gytis Svinkūnas. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electric Power Systems

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: sunlight, energy of light, attenuation, artificial satellite, Mars, photovoltaic system, radioisotope energy system, thermoelectric generator.

Kaunas, 2017. 120 p.

SUMMARY

The objects of research of this study are space probes that orbits Sun or its systems bodies and rovers or stationary machines, located at the surface of such bodies. Following research is oriented to photovoltaic and nuclear energy systems, its capability of electrical energy generation and use. Study mainly focus on analysis of energy obtained by photovoltaic energy systems.

The topic of research of this study is relevant to the parties that plans or already does space exploration or commercial space orders, such as communication or spy satellites engineering. Likewise, to the companies that are working towards space tourism (e.g. *Bigelow Aerospace*) and space industry (e.g. *Blue Origin*) or developing plans of setting foot on the surface of Mars (e.g. *NASA* or *SpaceX*).

In the methodical part of this study a consecutive derivation of formulas, used in the investigative part, are introduced. A derivation of body equation of motion and a derivation of day and night length equations, are based on geocentric model assumption. Calculations of atmospheric attenuation are based on the data from *HITRAN* database of spectrometry. *MATLAB* and *GAMS* mathematical modelling platforms are being used for analysis performed in this study. To achieve a higher accuracy, calculations are performed using five significant digits (where it is possible) and approximating assumptions in formulas derivations are omitted. Results are given mainly for strategically important objects, distances and locations. For a better perception of outcome, results are often compared.

The following research is performed in this study: solar irradiance dependence on the distance between Sun and natural body or artificial probe; amount of energy dependence on geographic latitude and orbital location of the body, on which surface this energy is being extracted; orbital night (eclipse) length dependence on orbital parameters of spacecraft and body that this spacecraft orbits; atmospheric attenuation influence to the sunlight that reaches Earth and Mars surface; comparison of photovoltaic and radioisotope energy systems; analysis of sunlight energy that reaches potential Mars surface locations for habitable Mars workshop and colony.



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

(Fakultetas)

Gediminas Pranskūnas

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos sistemos (kodas 621H63005)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto

„Elektros energijos gamybos Saulės sistemos kūnų paviršiuje ir jų orbitose tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės 31 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Gedimino Pranskūno** baigiamasis projektas tema „Elektros energijos gamybos Saulės sistemos kūnų paviršiuje ir jų orbitose tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	9
LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	11
ĮVADAS.....	12
1. METODINĖ DALIS.....	14
1.1. Saulės šviesa, optiniai procesai ir orbitinė mechanika.....	14
1.1.1. Saulės šviesos energija.....	14
1.1.2. Skriejimas orbitoje.....	18
1.1.3. Saulės padėtis dangaus skliaute.....	22
1.1.4. Orbitinė naktis.....	29
1.2. Atmosferos įtaka ją kertančiai šviesai.....	33
1.2.1. Atmosferinė ekstinkcija.....	33
1.2.2. Optinio kelio ilgis ir oro masė.....	35
1.2.3. Atmosferos tankis ir elementų koncentracija.....	41
1.3. Fotovoltiniai elementai.....	46
1.3.1. Sistemų struktūra.....	46
1.3.2. Sandara ir veikimo principas.....	46
1.3.3. Tandeminiai fotovoltiniai elementai.....	49
1.3.4. Pritaikymas kosminiuose zonuose.....	50
1.4. Radioizotopų energijos sistemos.....	50
1.4.1. Pagrindinės savybės ir privalumai.....	51
1.4.2. Rūšys.....	52
2. TIRIAMOJI DALIS.....	56
2.1. Saulės šviesos energija kūnų paviršiuje ir jų orbitose.....	56
2.1.1. Nuotolio nuo Saulės įtaka kūną pasiekiančiai Saulės energinei apšvietai.....	56
2.1.2. Saulės padėties priklausomybė nuo stebėtojo geografinės platumos.....	58
2.1.3. Stebėtoją pasiekiantis Saulės šviesos energijos kiekis.....	62
2.1.4. Orbitinės nakties trukmė.....	68

2.1.5.	Poskyrio išvados.....	74
2.2.	Atmosferos įtakos ją kertančiai šviesai tyrimas	76
2.2.1.	Žemės ir Marso atmosferų funkcijos.....	76
2.2.2.	Absoliučioji oro masė.....	77
2.2.3.	Atmosferos optinis pralaidumas	79
2.2.4.	Saulės sistemos kūną pasiekiančios energinės apšvietos spektrinė analizė	84
2.2.5.	Poskyrio išvados.....	88
2.3.	Radioizotopų energijos sistemų panaudojimas.....	88
2.3.1.	Radioizotopų ir fotovoltinių energijos sistemų palyginimas.....	88
2.3.2.	Poskyrio išvados.....	93
2.4.	Elektros energijos gamyba Marso planetoje.....	93
2.4.1.	Elektros energijos gamyba strateginiuose Marso planetos taškuose.....	93
2.4.2.	Poskyrio išvados.....	95
	IŠVADOS.....	96
	LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	98
	PRIEDAI	102
	Priedas 1. Aplink Saulę skriejančio kūno nuotolio iki jos centro funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje	103
	Priedas 2. Saulės kampo virš horizonto funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje	104
	Priedas 3. Taškų, kuriuose Saulė kerta horizontą, apskaičiavimo funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje	105
	Priedas 4. Į Saulės sistemos kūno paviršių krentančios saulės šviesos energijos tankio apskaičiavimo funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje	107
	Priedas 5. Orbitinių saulėlydžio ir aušros kampų radimo funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje	108
	Priedas 6. Laiko, reikalingo įveikti apskritiminės orbitos lanką, apskaičiavimo funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje.....	109
	Priedas 7. Žemės atmosferos funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje	110
	Priedas 8. Marso atmosferos storio radimas „GAMS“ programinėje aplinkoje.....	111

Priedas 9. Marso atmosferos funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje.....	112
Priedas 10. Absoliučiosios oro masės funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje.....	113
Priedas 11. Papildytoji absoliučiosios oro masės funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje.....	114
Priedas 12. Maksimalaus zenitinio kampo funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje	115
Priedas 13. „HITRAN“ duomenų bazės spektrinių duomenų nuskaitymo iš bylos funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje.....	116
Priedas 14. Azoto dujų molinio ekstinkcijos ploto apskaičiavimo programa „MATLAB“ programinėje aplinkoje	117
Priedas 15. Atmosferos ir jos komponentų optinio gylio apskaičiavimo funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje	118
Priedas 16. Planko juodojo kūno spinduliuotės funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje ..	119
Priedas 17. Juodojo kūno energinės apšvietos nurodatame bangų ilgių diapazone apskaičiavimo funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje	120

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Saulės ir 5 772 K temperatūros juodojo kūno spektrinės energinės apšvietos kreivės bei jų ribojami plotai	15
1.2 pav. Šviesos šaltinis ir jį gaubianti sfera	16
1.3 pav. Elipsė ir pagrindiniai jos dydžiai	18
1.4 pav. Elipsė ir jos dydžiai kūnų orbitų analizei	19
1.5 pav. Stebėtojo judėjimas ant besisukančio dangaus kūno	24
1.6 pav. Tiesei AB statmenas apskritimas	26
1.7 pav. Azimuto, zenito ir altitudės kampai.....	27
1.8 pav. Brėžinys, zenitiniam kampui surasti.....	28
1.9 pav. Skirtingos trukmės orbitinių naktų atvejai ir jų veiksniai: (a) orbitos elipsiškumas, (b) orbitos posvyris	30
1.10 pav. Brėžinys, orbitinės nakties sąlygai išvesti	31
1.11 pav. Optinio kelio ilgio l , zenitinio kampo θ ir atmosferos aukščio hA sąryšis.....	36
1.12 pav. Geometrinis brėžinys atmosferos optinio kelio ilgiui ir oro masės dydžiui apskaičiuoti...36	
1.13 pav. Geometrinis brėžinys maksimaliam zenitiniam kampui apskaičiuoti	38
1.14 pav. Geometriniai brėžiniai atmosferos optinio kelio ilgiui ir oro masės dydžiui, kai zenitinis kampas yra didesnis nei 90° , apskaičiuoti	39
1.15 pav. Tandeminio fotovoltinio elemento: (a) struktūra, (b) atskirų sluoksnių sugeriamas saulės šviesos spektras [61].....	49
1.16 pav. Plutonio-238 dioksido granulė be iridžio apvalko (a) ir su juo (b) [55, 52].....	52
1.18 pav. Daugiafunkcio radioizotopų termoelektrinio generatoriaus sandara [53]	55
2.1 pav. Saulės sistemos kūnų energinės apšvietos priklausomybė nuo jų orbitinio kampo α	57
2.2 pav. Saulės aukštis dangaus skliaute ant: (a) Merkurijaus, (b) Žemės, (c) Marso ir (d) Cereros paviršių, $\phi = \{90^\circ; 45^\circ; 0^\circ; -45^\circ; -90^\circ\}$ geografinėse platumose, kūnams esant afelio taške.	60
2.3 pav. Maksimalus Saulės aukštis Marso planetos dangaus skliaute tam tikrose geografinėse šiaurės pusrutulio platumose vienerių siderinių metų laikotarpiu.....	61
2.4 pav. Saulės trajektorijos Marso planetos, esančios afelio taške, dangaus skliaute priklausomybė nuo rotacinio kampo β tam tikrose geografinėse šiaurės pusrutulio platumose	62

2.5 pav. Šviesiojo paros meto trukmė tam tikrose geografinėse šiaurės pusrutulio platumose: (a) Žemės planetoje, (b) Marso planetoje ir (c) Cereros nykštukinėje planetoje.....	64
2.6 pav. Saulės šviesos energijos kiekis per vieną parą stačiu kampu krentantis į vieną kvadratinį metrą kūno paviršiaus tam tikrose geografinėse šiaurės pusrutulio platumose: (a) Žemės planetoje, (b) Marso planetoje ir (c) Cereros nykštukinėje planetoje	67
2.7 pav. Orbitinės nakties trukmės priklausomybė nuo orbitos aukščio Veneros, Žemės ir Marso planetoms	70
2.8 pav. Orbitinės nakties trukmės priklausomybė nuo orbitos posvyrio.	71
2.9 pav. Orbitinės nakties trukmės priklausomybė nuo orbitos posvyrio per vienerius kūno metus.	73
2.10 pav. Absoliučiosios Marso oro masės priklausomybė nuo stebėtojo altitudės	77
2.11 pav. Absoliučiosios Marso oro masės priklausomybė nuo zenitinio kampo	78
2.12 pav. Absoliučiosios Marso oro masės priklausomybė nuo zenitinio kampo: (a) pilnas grafikas, (b) grafiko dalis nuo $\zeta = 0 \text{ kg/m}^2$ iki $\zeta = 400 \text{ kg/m}^2$	78
2.13 pav. Specifinio ekstinkcijos ploto ξ kreivės: (a) Žemės atmosferai, (b) atskiroms Žemės atmosferos komponentėms, (c) Marso atmosferai ir (d) atskiroms Marso atmosferos komponentėms	83
2.14 pav. Saulės spektrinė energinė apšvieta, pasiekianti Žemės ir Marso planetų atmosferas	86
2.15 pav. Saulės spektrinė energinė apšvieta, stačiu kampu kirtusi Žemės ir Marso planetų atmosferas.....	87
2.16 pav. Atmosferinės ekstinkcijos priklausomybės nuo zenitinio kampo Žemės ir Marso planetose $100 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1850 \text{ nm}$ elektromagnetinių bangų intervale	88
2.17 pav. Daugiafunkcio radioizotopų generatoriaus ir fotovoltinių baterijų priklausomybės nuo jų misijos laiko ir aparato nuotolio iki Saulės bei vidutiniai Marso, Cereros, Jupiterio ir Saturno nuotoliai iki Saulės	92
2.18 pav. Acidalia Planitia lyguma (rausva spalva) ir Arsia Mons (šviesiai žalia spalva) bei Pavonis Mons (šviesiai mėlyna spalva) vulkanai Marso planetoje	94
2.19 pav. 1 m ² ploto fotovoltinė sistema per vieną Marso parą išgautinas energijos kiekis tam tikrose Marso planetos vietose	94
2.20 pav. Šviesiojo paros meto trukmė tam tikrose Marso planetos vietose	95

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Saulės sistemos kūnų parametrai	21
1.2 lentelė. Saulės sistemos kūnų, tinkamų FV masyvams ant jų paviršiaus įrengti, parametrai	22
1.3 lentelė. Atmosferos sluoksnių regionų temperatūros kitimo bei baziniai parametrai	42
2.1 lentelė. Saulės sistemos kūnų energinės apšvietos dydžiai pagal jų nuotolį nuo Saulės	57
2.2 lentelė. Metinis į vieną Saulės sistemos kūno paviršiaus kvadratinį metrą krentantis saulės šviesos energijos kiekis geografinėse platumose, išdėstytose 10° intervalu.....	68
2.3 lentelė. χ_i ir M_i parametrai Žemės bei Marso atmosferoms.....	82

ĮVADAS

Daugiau nei penkis dešimtmečius radioizotopų bei fotovoltinės energijos sistemos vaidina itin svarbų vaidmenį tyrinėjant kosmosą, įgalindamos misijas Saulės sistemoje iki pat jos pakraščių. Įvykusios kosminės odisejos padėjo atskleisti Žemės palydovo – Mėnulio – savybes ir jo atsiradimo istoriją, leido tapti ledinių geizerių ir sieros ugnikalnių kaimyninėse planetose liudytojais bei įrodė galimybę pasiekti Saulės sistemos pakraščius.

Energija yra būtinybė, be kurios erdvėlaiviai ir dirbtiniai palydovai negali išsiversti nė minutės. Be patikimos technologijos, galinčios užtikrinti kosmoso misijas, žmonijos žinios apie Saulės sistemą būtų tik maža smiltelė palyginti su tuo, kas žinoma dabar. Nors buvo atlikta nemažai įvairių elektros energijos gamybos kosmoso erdvėje bandymų, tačiau išvada gali skambėti neįtikėtina – šiuo metu egzistuoja tik dvi patikimos praktinės technologijos, kuriomis galima kurti ilgalaikę elektros energiją už Žemės ribų, tai – saulės šviesa arba branduolinių skilimų metu išsiskirianti energija.

Temos aktualumas

2016-aisiais metais į orbitą aplink Žemę iškelta 80 dirbtinių palydovų. Dar du kosminiai zondai buvo išsviesti Marso planetos bei asteroido „101955 Bennu“ link. Nors per pastaruosius kelerius metus paleistų kosminių zondu kiekis nesikeičia, tačiau netolimoje ateityje prognozuojamas eksponentinis šio skaičiaus augimas. Norint, kad į orbitą aplink Saulę ar jos sistemos kūną paleistas kosminis zondas bei ant šio kūno paviršiaus esantys įrenginiai būtų užtikrinti nepertraukiama elektros energija, būtina žinoti, kokį energijos kiekį galima išgauti taikant tam tikras technologijas. Be to, elektros energiją iš saulės šviesos gaminantiems ir ją vartojantiems aparatams būtina parinkti chemines baterijas, kurių talpa tiesiogiai priklauso nuo tamsiojo paros meto (orbitinės nakties) trukmės.

Darbo tikslas:

Ištirti Saulės ir jos sistemos kūnų orbitose skriejančius bei šių kūnų paviršiuje esančius kosminius zondus pasiekiantį saulės šviesos energijos kiekį, apskaičiuoti laiko intervalus, kuriuose saulės šviesa aparatų nepasiekia (pasiekia), bei išnagrinėti minėtųjų dydžių priklausomybę nuo aparato geografinės padėties kūno paviršiuje ar jo orbitos parametru, skriejant aplink kūną. Taip pat ištirti Žemės bei Marso atmosferų įtaką jas kertančiai saulės šviesai bei išnagrinėti, koku atveju dirbtiniame palydove fotovoltinius elementus tikslinga pakeisti radioizotopų termoelektriniais generatoriais.

Darbo uždaviniai:

1. Ištirti Saulės energinės apšvietos dydžio priklausomybę nuo objekto atstumo iki Saulės bei orbitos aplink ją elipsiškumo. Šio dydžio vertes apskaičiuoti pagrindiniams bei strategiškai svarbiems Saulės sistemos kūnams jų mažiausiame, vidutiniame ir didžiausiame nuotolyje nuo Saulės;
2. Ištirti energijos kiekio, per vieną parą išgautino tam tikrų Saulės sistemos kūnų paviršiuje, priklausomybę nuo šio kūno apsisukimo aplink savo ašį periodo, sukimosi ašies posvyrio į kūno orbitos ašį, stebėtojo geografinės padėties šio kūno paviršiuje bei kūno padėties orbitoje aplink Saulę;
3. Apskaičiuoti energijos kiekį, išgautiną tam tikrų Saulės sistemos kūnų paviršiuje per vieną jų orbitinį periodą aplink Saulę. Palyginti vertes, gautas šiaurės ir pietų pusrutuliuose bei pusiaujo zonoje;
4. Ištirti orbita aplink Saulės sistemos kūną skriejančio kosminio zondo orbitinės nakties trukmės priklausomybę nuo šio kūno parametrų – masės, skersmens, nuotolio nuo Saulės – bei zondo orbitos spindulio ir jos posvyrio į kūno orbitos plokštumą. Apskaičiuoti orbitinės nakties trukmę objektams, skriejantiems geosinchroninėje bei kitose, strategiškai svarbiose, kūnų orbitose;
5. Ištirti Žemės ir Marso atmosferų bei jų sudedamųjų dalių įtaką jas kertančiai saulės šviesai. Ištirti zenitinio kampo įtaką atmosferinės (optinės) ekstinkcijos dydžiui. Apskaičiuoti sugertos bei išsklaidytos Saulės energinės apšvietos dydį spinduliams, atmosferą kertantiems zenito bei horizonto kryptimis;
6. Palyginti fotovoltines ir radioizotopų energijos sistemas. Surasti ribą, kuri atskiria šiuo metu egzistuojančių technologijų panaudojimo atvejus;
7. Ištirti elektros energijos gamybos aspektus Marso planetos paviršiaus vietose, kuriose planuojama įrengti pirmąsias apgyvendintas tyrimų stotis. Šioms vietoms apskaičiuoti jas pasiekiantį didžiausią ir mažiausią vienos paros bei suminį vienerių Marso metų saulės šviesos energijos tankį.

1. METODINĖ DALIS

1.1. Saulės šviesa, optiniai procesai ir orbitinė mechanika

1.1.1. Saulės šviesos energija

Saulė yra 1,39 milijonų kilometrų skersmens degantis kamuolys, kurio didžiąją dalį sudaro vandenilio plazma [1]. Skirtingai nei įprasta matyti, degimo procesas Saulėje yra kitoks – vietoje cheminės oksidacijos reakcijos čia vyksta plazmos sintezė¹, kurios metu du vandenilio jonai jungiasi suformuodami helio joną ir išskirdami milžinišką energijos kiekį. Išsiskyrusios energijos kiekis yra didesnis, nei skaldant atomus, kas yra šiuolaikinis atominių elektrinių veikimo principas. Būtent dėl šios priežasties viso pasaulio mokslininkai atomų branduolių sintezę bando suvaldyti tokamakų² ir stelaratorių³ tipo reaktoriuose. Tai žmonijai leistų išgauti švarią ir praktiškai neribotą energiją.

Saulės branduolio temperatūra siekia 15,7 milijonus kelvinų, tačiau jos skleidžiama elektromagnetinė spinduliuotė gali būti aprašoma 5 772 K temperatūros juodojo kūno spinduliuote [2]. 1.1 paveiksle yra pavaizduotos juodojo kūno ir Saulės spinduliuočių spektrinės energinės apšvietos (angl. *spectral irradiance*) kreivės bei matomosios šviesos spektro ribos. Iš grafiko matyti, kad kreivės yra panašios, tačiau Saulės atveju ji turi staigių šuolių ir kritimų. Tikslia matematine formule, deja, ši kreivė užrašyta būti negali, o dominanti reikšmė imama iš specialių lentelių, pavyzdžiui, visuotiniu standartu laikomos ASTM E-490 [3]. 5 772 K temperatūros juodojo kūno spinduliuotės kreivė aprašoma remiantis Planko (angl. *Planck*) juodojo kūno spinduliuotės dėsnium (1.1) [4].

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (1.1)$$

Čia: $I(\lambda, T)$ – juodojo kūno spektrinė energinė apšvieta, $W \cdot nm/m^2$;

λ – elektromagnetinės bangos ilgis, m;

T – juodojo kūno temperatūra, K;

c – šviesos greitis vakuume. $c = 299\,792\,458$ m/s;

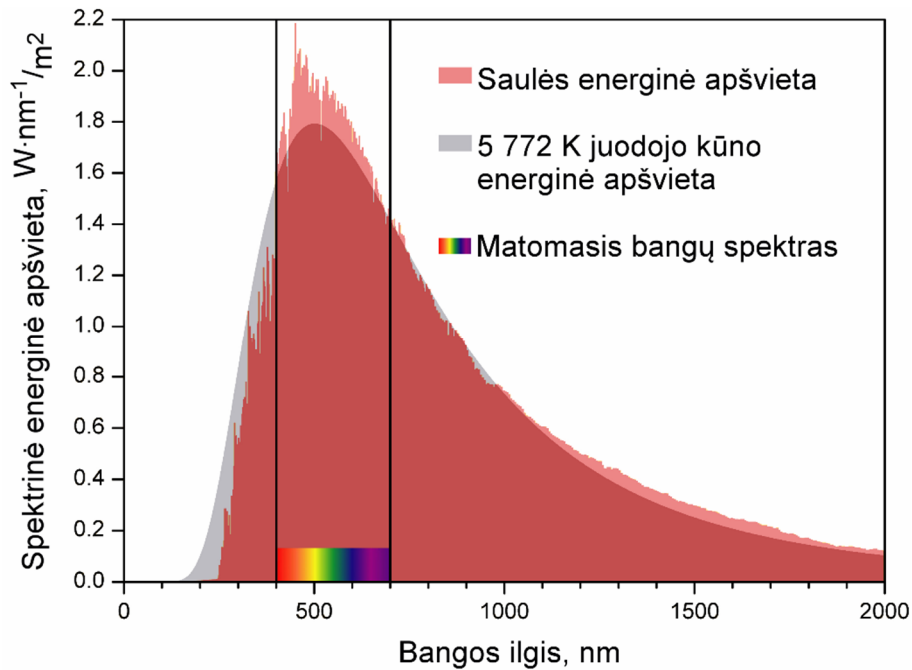
h – Planko konstanta. $h = 6,626\,070\,041 \cdot 10^{-34}$ J · s;

k – Bolcmano konstanta. $k = 1,380\,650\,424 \cdot 10^{-23}$ J/K.

¹ siūtežė [gr. synthesis – sujungimas, sudarymas, derinimas]: chem. junginių gavimas iš kt. chem. sandaros medžiagų. Tarptautinių žodžių žodynas, 1985

² tokamakas [rus. tokamak < to(roidalnaja) ka(mera) (s) mag(nitnym polem)], valdomos termobranduolinės sintezės reakcijos sukėlimo įtaisas – plazmos toroidinė magn. gaudyklė. Tarptautinių žodžių žodynas, 1985

³ stelaratorius [angl. stellarator], aukštos temperatūros plazmos magn. gaudyklė. Tarptautinių žodžių žodynas, 1985



1.1 pav. Saulės ir 5 772 K temperatūros juodojo kūno spektrinės energinės apšvietos kreivės bei jų ribojami plotai

Fizikoje kūnas, sugeriantis absoliučiai visas į jį krentančias elektromagnetines bangas, vadinamas juodoju kūnu [5]. Bet koks didesnės nei 0 K temperatūros iš atomų sudarytas materijos vienetas skleidžia elektromagnetinę spinduliuotę, o jos energija yra aprašoma Stefano-Bolcmano dėsnio (1.2), teigiančiu, kad vienetinio ploto juodojo kūno suminė visuose bangos ilgiuose išspinduliuojama galia – energinė apšvieta – yra tiesiogiai proporcinga šio kūno absoliučiajai temperatūrai ketvirtuoju laipsniu [6]. Vis dėlto absoliučiai juodieji kūnai gamtoje neegzistuoja, net ir juodosios bedugnės, Stiveno Hokingo (angl. *Stephen Hawking*) teigimu, skleidžia silpną elektromagnetinę spinduliuotę, tačiau Stefano-Bolcmano dėsnis puikiai tinka Saulės bei kitų žvaigždžių spinduliuotei aprašyti.

$$j = \sigma T^4 \quad (1.2)$$

Čia: j – juodojo kūno energinė apšvieta, W/m^2 ;

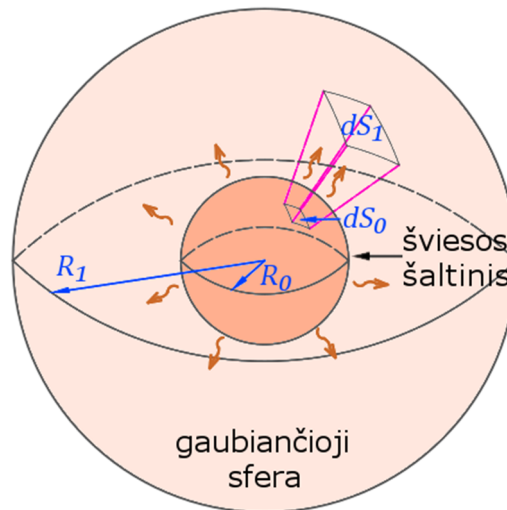
T – juodojo kūno temperatūra, K;

σ – Stefano-Bolcmano konstanta. $\sigma = 5,670\,373 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$.

Saulės energinė apšvieta apskaičiuojama taikant (1.2) lygtį:

$$j_s = \sigma T_s^4 = 5,670\,373 \cdot 10^{-8} \cdot 5\,772^4 = 62,94 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$$

Iš rezultato matytina, kad vienas kvadratinis metras Saulės paviršiaus išspinduliuoja milžinišką kiekį energijos. Vos 48 kvadratiniai metrai Saulės paviršiaus išspinduliuoja daugiau energijos nei pagamindavo pilnu pajėgumu veikdavusi Ignalinos atominė elektrinė, užėmusi 0,75 km² (15,6 tūks. kartų didesnį) plotą. Saulės spindulys lygus 695,7 tūkstančiams kilometrų, o jos paviršiaus plotas – 6,09 · 10¹⁸ m². Vadinasi, Saulės pilnoji spinduliuotės galia – šviesis – yra 3,838 · 10²⁶ vatų. Tai – milžiniškas skaičius. Žmonija per visus 2012-uosius metus suvartojo 20,9 PWh elektros energijos, o tokiu tempu visą per vieną sekundę Saulės pagamintą energiją suvartotų per 5,1 milijoną metų [7]. Iš esmės visos Saulės išspinduliuotos energijos suvartojimas dėl daugelio priežasčių yra neįmanomas, nebent mokslinėje fantastikoje (pavyzdžiui, Olafo Stapledon „Žvaigždžių kūrėjas“).



1.2 pav. Šviesos šaltinis ir jį gaubianti sfera

Įsivaizduokite, kad R_0 spindulio ir $S_0 = 4\pi R_0^2$ ploto sferinis šviesos šaltinis yra apgaubtas R_1 spindulio ir $S_1 = 4\pi R_1^2$ ploto kita, didesne, sfera (1.2 pav.) Tokiu atveju visa šviesos šaltinio išspinduliuojama energija yra lygi didesniosios sferos sugeriamai energijai, tačiau pastarosios plotas yra didesnis, todėl iš vieno kvadratinio metro šviesos šaltinio išspinduliuota energija ir tokiame pat gaubiančiosios sferos plote sugerta energija yra skirtingų dydžių. Šių dviejų dydžių santykis lygus jų sferų plotų arba spindulių kvadratų santykiui:

$$E_{\text{šs}} = E_{\text{sf}}$$

$$E = jSt$$

$$j_{\text{šs}}S_0t = j_{\text{sf}}S_1t$$

$$\frac{j_{sf}}{j_{\text{ss}}} = \frac{S_0}{S_1} = \frac{4\pi R_0^2}{4\pi R_1^2} = \frac{R_0^2}{R_1^2}$$

$$j_{sf} = j_{\text{ss}} \frac{R_0^2}{R_1^2} \quad (1.3)$$

Išraišką pritaikius Saulei, j_{sf} užrašant kaip $j_{[SSK]}$, kur SSK reiškia Saulės sistemos kūną, bei atstumą tarp Saulės ir šio kūno centrų pažymint kaip $l_{[SSK]}$, gaunama:

$$j_{[SSK]} = j_s \frac{R_0^2}{l_{[SSK]}^2} = j_s \frac{4\pi R_0^2}{4\pi l_{[SSK]}^2}$$

$$j_{[SSK]} = \frac{L_{\odot}}{4\pi l_{[SSK]}^2} \quad (1.4)$$

Čia: L_{\odot} – Saulės šviesis. $L_{\odot} = 3,828 \cdot 10^{26} \text{ W/m}^2$.

Svarbu paminėti, kad gautoji $j_{[SSK]}$ išraiška neapima planetos atmosferinės ekstinkcijos⁴, dėl kurios šviesos spinduliai, kirsdami atmosferą, yra sugeriami arba išsklaidomi, bei atstumo iki Saulės svyravimo. Pastarasis atsiranda dėl to, kad planeta aplink Saulę juda ne apskritimo, tačiau elipsės formos orbita. Atmosferinės ekstinkcijos ir orbitos elipsiškumo veiksniai yra analizuojami kituose šio poskyrio punktuose.

Remiantis (1.4) formule ir žinant, kad vidutinis atstumas tarp Saulės ir Žemės yra lygus $149,6 \cdot 10^9$ metrų, apskaičiuojama Saulės spinduliuotės energinę apšvietą, pasiekianti Žemės paviršių:

$$j_{[Z]} = \frac{L_{\odot}}{4\pi l_{[Z]}^2} = \frac{3,828 \cdot 10^{26}}{4\pi \cdot (149,6 \cdot 10^9)^2} = 1\,361 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Žemę iš Saulės pasiekiantys spinduliai krenta į $\pi R_{[Z]}^2$ plotą, todėl pilnoji per 1 sekundę visą Žemės rutulį pasiekianti saulės šviesos energija lygi:

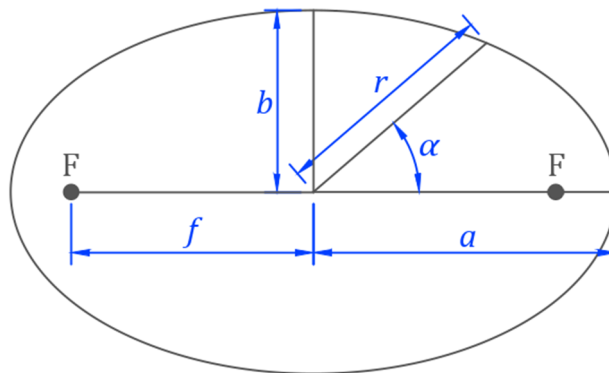
$$E_{[Z]} = j_{[Z]} \cdot \pi R_{[Z]}^2 \cdot t = 1\,361 \cdot 3,141\,6 \cdot 6\,371\,000^2 \cdot 1 = 1,735 \cdot 10^{17} \text{ J} = 4,821 \cdot 10^{13} \text{ Wh}$$

⁴ Ekstinkcija [lot. ex(s)tinctio – gesinimas], šviesos srauto stiprumo mažėjimas aplinkoje dėl sugėrimo ir sklaidos. Tarptautinių žodžių žodynas, 1985

Anksčiau paminėta, kad žmonija per visus 2012-uosius metus suvartojo 20,9 PWh elektros energijos, todėl tokiu tempu visą per 1 sekundę Žemę pasiekianti saulės šviesos energija būtų suvartota per šiek tiek daugiau nei 20 valandų. Vadinasi, Žemę vien iš Saulės pasiekia 72 tūks. kartų daugiau energijos nei jos suvartojama.

1.1.2. Skriejimas orbitoje

Įprasta manyti, kad Saulės sistemos kūnai aplink savo žvaigždę skrieja apskritimine trajektorija (orbita), tačiau iš tikrųjų jie skrieja elipsine orbita, kurios viename iš židinių yra Saulė. Pagrindinis skirtumas tarp elipsės ir apskritimo yra tas, kad pastarasis vietoje centro turi du židinius, tačiau kartu panašu tai, kad joje taško atstumų iki kiekvieno židinio suma yra pastovus dydis, kaip apskritime yra taško atstumas iki centro. Mechanikos mokslo sritis, aprašanti kūnų judėjimą įvairių tipų (elipsė, hiperbolė, parabolė) orbitose, vadinama orbitine mechanika.



1.3 pav. Elipsė ir pagrindiniai jos dydžiai

Norint suprasti elipsinės orbitos analizavimo ypatumus, pirmiausia reikia žinoti pagrindinius šios figūros dydžius. Elipsės struktūra ir parametrai yra pavaizduoti 1.3 paveiksle. Vietoje spindulio elipsė turi du pusašius: didįjį ir mažąjį, atitinkamai žymimus a ir b , o jos kanoninė⁵ lygtis pateikta (1.5) išraiškoje. Pastebėtina, kad ši figūra atrodo tarsi suplotas apskritimas, iš tikrųjų ekscentricitetas, žymimas ε , nurodo, kiek figūra yra nukrypusi nuo apskritimo formos. Yra išskiriami specialūs atvejai:

$\varepsilon = 0$ – apskritimas;

$\varepsilon \in (0; 1)$ – elipsė;

$\varepsilon \in [1; 2)$ – parabolė;

$\varepsilon \in [2; +\infty)$ – hiperbolė;

⁵ kanoninis [↗ kanonas], fiz. susijęs su paprasčiausia arba svarbiausia funkcijos, lygties, taisyklės forma, pvz., ~ės lygtys.

Šaltinis: Tarptautinių žodžių žodynas, 1985

$\varepsilon = +\infty$ – tiesė.

Ekscentricitetas yra apskaičiuojamas naudojantis (1.8) lygtimi. Atstumas tarp elipsės centro ir vieno (bet kurio) iš jos židinių yra žymimas f bei apskaičiuojamas pagal (1.9) formulę.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (1.5)$$

Čia: x – elipsės taško abscisė;

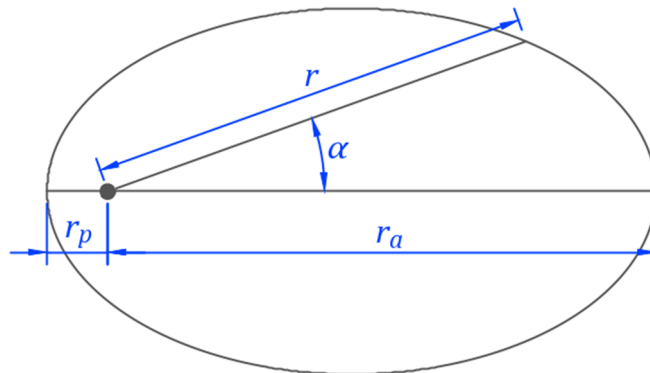
y – elipsės taško ordinatė.

$$x = a \cos \alpha \quad (1.6)$$

$$y = b \sin \alpha \quad (1.7)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}} \quad (1.8)$$

$$f = \sqrt{a^2 - b^2} = a\varepsilon \quad (1.9)$$



1.4 pav. Elipsė ir jos dydžiai kūnų orbitų analizei

Anksčiau paminėta, kad planetos aplink Saulę skrieja orbita, kurios viename iš židinių yra Saulė. Vadinasi, (1.6) ir (1.7) formulės šiame darbe atliekamai analizei yra netinkamos, nes jos aprašo elipsės taško koordinatas nuo jos centro, kai reikalingos koordinatės nuo vieno iš jos židinių. Remiantis 1.4 pav. išvedama lygtis kūno judėjimui aprašyti, kai atskaitos taškas yra jo elipsinės orbitos židinyje. 1.4 paveiksle pavaizduoti dydžiai yra: r – atstumas tarp židinio ir kūno, α – kampas tarp r ir elipsės didžiojo pusašio. Pagal šiuos duomenis (1.6) ir (1.7) lygtys pakeičiamos (1.10) ir (1.11) išraiškomis, o jas įrašius į kanoninę lygtį (1.5) randamas parametras r .

$$x = r \cos \alpha - f \quad (1.10)$$

$$y = r \sin \alpha \quad (1.11)$$

$$\begin{aligned} \frac{(r \cos \alpha - f)^2}{a^2} + \frac{(r \sin \alpha)^2}{b^2} &= 1 \\ b^2(r \cos \alpha - f)^2 + a^2(r \sin \alpha)^2 &= a^2 b^2 \\ b^2 r^2 \cos^2 \alpha - 2b^2 f r \cos \alpha + b^2 f^2 + a^2 r^2 \sin^2 \alpha &= a^2 b^2 \end{aligned}$$

Panaudojant (1.9) lygtį, kurioje $f = a\varepsilon$ bei $b^2 = a^2(1 - \varepsilon^2)$, išvestą pertvarkant tą pačią išraišką, gaunama:

$$\begin{aligned} a^2(1 - \varepsilon^2)r^2 \cos^2 \alpha - 2a^2(1 - \varepsilon^2)a\varepsilon r \cos \alpha + a^2(1 - \varepsilon^2)a^2\varepsilon^2 + a^2 a^2 r^2 \sin^2 \alpha \\ = a^2 a^2 (1 - \varepsilon^2) \end{aligned}$$

Padalinant iš a^2 bei $\sin^2 \alpha$ pakeitus į $1 - \cos^2 \alpha$, gaunama:

$$\begin{aligned} (1 - \varepsilon^2)r^2 \cos^2 \alpha - 2(1 - \varepsilon^2)a\varepsilon r \cos \alpha + a^2\varepsilon^2 - a^2\varepsilon^4 + r^2 - r^2 \cos^2 \alpha - a^2(1 - \varepsilon^2) &= 0 \\ r^2 + r^2 \cos^2 \alpha - \varepsilon^2 r^2 \cos^2 \alpha - r^2 \cos^2 \alpha - 2(1 - \varepsilon^2)a\varepsilon r \cos \alpha + a^2\varepsilon^2 - a^2\varepsilon^4 - a^2 + a^2\varepsilon^2 &= 0 \\ r^2 - \varepsilon^2 r^2 \cos^2 \alpha - 2(1 - \varepsilon^2)a\varepsilon r \cos \alpha - a^2\varepsilon^4 + 2a^2\varepsilon^2 - a^2 &= 0 \\ r^2 - \varepsilon^2 r^2 \cos^2 \alpha - 2(1 - \varepsilon^2)a\varepsilon r \cos \alpha - a^2(1 - 2\varepsilon^2 + \varepsilon^4) &= 0 \\ r^2 - [\varepsilon^2 r^2 \cos^2 \alpha + 2a(1 - \varepsilon^2)\varepsilon r \cos \alpha + a^2(1 - \varepsilon^2)^2] &= 0 \\ r^2 - [\varepsilon r \cos \alpha + a(1 - \varepsilon^2)]^2 &= 0 \\ r^2 &= [\varepsilon r \cos \alpha + a(1 - \varepsilon^2)]^2 \\ r &= \pm[\varepsilon r \cos \alpha + a(1 - \varepsilon^2)] \end{aligned}$$

Atstumas r turi būti teigiamas, nes neigiama jo reikšmė neturi fizikinės prasmės. Kadangi analizuojamos yra tik elipsinės ir apskritiminės orbitos, kai $0 \leq \varepsilon < 1$, be to, a yra visada teigiamas ir nelygus 0, todėl tiek pirmoji, tiek antroji dedamosios laužtiniuose skliaustuose yra teigiamos. Tai rodo, jog ženklas turi būti teigiamas, todėl:

$$\begin{aligned} r &= a(1 - \varepsilon^2) + \varepsilon r \cos \alpha \\ r(1 - \varepsilon \cos \alpha) &= a(1 - \varepsilon^2) \\ r &= \frac{a(1 - \varepsilon^2)}{(1 - \varepsilon \cos \alpha)} \end{aligned} \quad (1.12)$$

Gautoje lygtyje naudojami didžiojo pusašio ir ekscentriciteto parametrai, tačiau juos patogiau išreikšti periapsio ir apoapsio nuotoliais, kurie atitinkamai nurodo mažiausią ir didžiausią atstumą iki kūno, aplink kurį skriejama. Saulės atveju periapsio ir apoapsio taškai dar vadinami periheliu ir afeliu. Juos atitinkamai pažymėjus r_p ir r_a , galima užrašyti:

$$a = \frac{1}{2}(r_a + r_p) \quad (1.13)$$

$$\varepsilon = \frac{r_a - r_p}{r_a + r_p} \quad (1.14)$$

1.1 lentelėje yra nurodyti tam tikrų Saulės sistemos kūnų spinduliai, perihelio ir afelio nuotoliai bei papildomi parametrai, kurie naudojami tolesniuose punktuose ir tiriamojoje dalyje.

1.1 lentelė. Saulės sistemos kūnų parametrai

Saulės sistemos kūno:		Parametras				
		Nuotolis iki Saulės $\times 10^9$ m		Kūno spindulys $\times 10^3$ m	Masė $\times 10^{23}$ kg	Orbitinis periodas*
Regionas	Pavadinimas	Perihelio	Afelio			
Vidinė Saulės sistema	Merkurijus ^[8]	46,001	69,817	2 439,7	3,301 1	87,969
	Venera ^[9]	107,48	108,94	6 051,8	48,675	224,70
	Žemė ^[10]	147,10	152,10	6 371,0	59,724	365,26
	Marsas ^[11]	206,62	249,23	3 389,5	6,417 1	686,98
Asteroidų žiedas	Vesta ^[12] (asteroidas)	321,79	384,72	265	0,002 589	1 325,4
	Cerera ^[13] (nykštukinė planeta)	382,62	445,41	473	0,009 393	1 681,6
Išorinė Saulės sistema	Jupiteris ^[14]	740,55	816,04	69 911	18 986	4 332,6
	Saturnas ^[15]	1 352,6	1 514,5	60 268	5 680	10 747
	Uranas ^[15]	2 741,3	3 003,6	25 559	868	30 589
	Neptūnas ^[15]	4 444,5	4 545,7	24 764	1 020	59 800
Koiperio juosta	Plutonas ^[15] (nykštukinė planeta)	4 436,8	7 375,9	1 185	0,146	90 560
	Eridė ^[16] (nykštukinė planeta)	5 723,0	14 602	1 193,0	0,166	203 830

*Orbitinis periodas skaičiuojamas Žemės dienomis d_{sa_z} . $d_{sa_z} = 24\text{h} = 86\,400\text{s}$.

Turint atstumą tarp Saulės ir aplink ją skriejančio kūno bei pasinaudojant anksčiau išvestomis formulėmis, galima apskaičiuoti ant šio kūno esantį fotovoltinių elementų masyvą pasiekiančią

Saulės spinduliuotės galią. Idealiu atveju ji apskaičiuojama energinės apšvietos dydį padauginant iš masyvo ploto, tačiau tai galioja, tik jei šviesos spinduliai į jį krenta stačiu kampu. Deja, esant mažesniai nei 90° kampui, generuojama galia krenta, todėl fotovoltiniai masyvai turi sekti Saulės padėtį dangaus skliaute. Saulės padėties dangaus skliaute veiksnys yra analizuojamas sekančiame – 1.1.3 punkte.

1.1.3. Saulės padėtis dangaus skliaute

Žinoma, kad Žemė bei kiti Saulės sistemos kūnai aplink savo žvaigždę skrieja elipsinėmis orbitomis. Elipsė yra ne erdvinė, bet plokštumos figūra. Vadinasi, kiekvieno Saulės sistemos kūno judėjimas gali būti užrašomas jo orbitos plokštumoje. Toks judėjimo užrašymas palengvina kūno padėties analizę, tačiau paminėtina, kad Saulės sistemos kūnų orbitų plokštumos yra skirtingos. Vis dėlto į pastarąjį faktą reikia atsižvelgti tik tada, kai yra analizuojama kūnų tarpusavio sąveika, tačiau šiame darbe kiekvienas Saulės sistemos kūnas yra analizuojamas atskirai, todėl jų orbitų plokštumų padėtis yra nesvarbi.

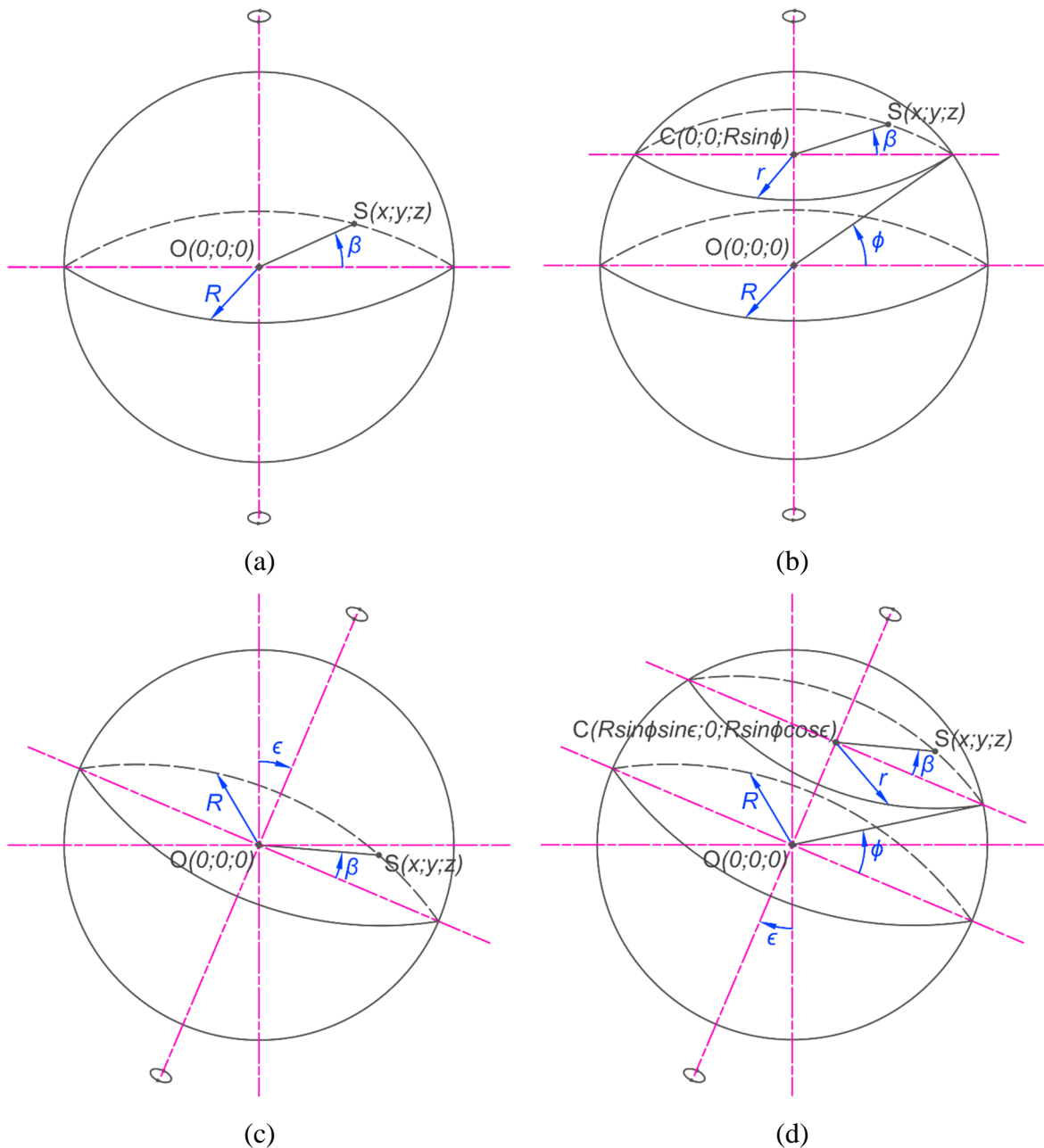
Kūnas skriedamas aplink Saulę tuo pat metu sukasi aplink savo ašį. Jei sukimosi ašis yra statmena orbitos plokštumai, tada jos ir jo orbitos ašies kryptys yra vienodos (abi ašys lygiagrečios), be to, tokiu atveju bet kuriame aukštyje virš plokštumos ašies esantis stebėtojas bet kuriuo paros metu liks tame pačiame aukštyje, t.y. jis nepriklauso nuo planetos sukimosi. Kai kūno sukimosi ašis yra pasvirusi į orbitos plokštumą, vieno apsisukimo metu stebėtojo aukštis šios plokštumos atžvilgiu kinta. Iš tikrųjų tik Merkurijaus sukimosi ašies kryptis gali būti laikoma sutampanti su jo orbitos ašies kryptimi (skirtumas tik $0,034^\circ$), o visiems kitiems Saulės sistemos kūnams šios ašys yra pasvirusios tam tikru kampu ϵ . Tam tikrų kūnų sukimosi ašies posvyrio vertės bei papildomi parametrai, naudojami tolimesniuose punktuose ir tiriamojame dalyje, pateikti 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė. Saulės sistemos kūnų, tinkamų FV masyvams ant jų paviršiaus įrengti, parametrai

Saulės sistemos kūnas	Parametras						
	Ašies posvyris $\epsilon, ^\circ$	Vienerių metų trukmė dienomis ($T_{<...>}$)			Vienos $\langle \dots \rangle$ paros trukmė, h		Kampas tarp afelio ir saulėgrįžos taškų $\alpha_0, ^\circ$
		Siderinėmis, d_{Si}	Saulės, d_{Sa}	Saulės Žemėje, d_{SaZ}	Siderinės (d_{Si})	Saulės (d_{Sa})	
Merkurijus	0,034 ^[8]	1,500 0	0,500 0 ^[8]	87,969 ^[8]	1 407,5 ^[8]	4 222,5	N/A (0) ^[18]
Žemė	23,44 ^[10]	366,27	365,26 ^[10]		23,934 ^[10]	24,000	12,476
Marsas	25,19 ^[11]	669,59	668,58	686,98 ^[17]	24,623 ^[17]	24,660	-19 ^[19]
Cerera	10,59 ^[13]	4 447,6	4 446,6	1 681,6 ^[13]	9,074 2	9,076 2	-17,186 ^[20]

1.2 lentelėje nėra informacijos apie išorinės Saulės sistemos planetas bei kai kurias nykštukines planetas ar asteroidus, nes pastarieji kūnai yra netinkami energijos iš saulės šviesos gamybai dėl šių priežasčių: dujinės milžinės neturi kieto paviršiaus, ant kurio būtų galima įrengti fotovoltinių elementų masyvus, Koiperio juostos nykštukinės planetos (Plutonas ir Eridė) yra per daug toli ir jas pasiekia labai mažas saulės šviesos kiekis (analizė pateikta 2-ojo skyriaus 1-ojo poskyrio 1-ajame punkte), o asteroidų gravitacija yra pernelyg silpna konstrukcinių elementų nuleidimui ant jų paviršiaus.

1.5 paveiksle pavaizduoti 4 išskirtiniai atvejai, kuriais gali būti aprašomas stebėtojo judėjimas ant besisukančio dangaus kūno paviršiaus ar jo orbitoje: (a) atveju kūno sukimosi ašis yra statmena orbitos plokštumai, kurioje ir vyksta stebėtojo judėjimas, (b) atveju kūno sukimosi ašis taip pat yra statmena orbitos plokštumai, tačiau kūnas juda lygiagrečiai jai pastoviam aukštyje $z = R \sin \phi$, kur R yra kūno spindulys, o ϕ – stebėtojo geografinė platumas, (c) ir (d) atvejai yra išplėstiniai (a) ir (b) variantai, kuriuose kūno sukimosi ašis yra pasvirusi kampui ϵ į orbitos ašį. Paminėtina, kad orbita aplink kūną skriejančio stebėtojo judėjimas yra analogiškas (a) ir (c) atvejams, tik tada R nurodo ne kūno, bet stebėtojo orbitos spindulį. (b) ir (d) atvejai orbitoms analizuoti netinka, nes objektas visada skrieja aplink natūralaus dangaus kūno masės centrą 1.5 paveiksle pažymėtą raide O .



1.5 pav. Stebėtojo judėjimas ant besisukančio dangaus kūno

Yra keletas būdų, kaip remiantis stebėtojo judėjimu ant dangaus kūno paviršiaus ar jo orbitoje gali būti analizuojama Saulės padėtis dangaus skliaute. Vienas iš jų – abscisių arba ordinačių ašį laikyti visada nukreiptą į Saulę, tačiau tokiu atveju kūno sukimosi ašies posvyrio į orbitos plokštumą kampas turi būti skaidomas į dvi dedamąsias: po vieną kiekvienai iš ašių, o tai tiek lygtis, tiek analizę daro sudėtingomis. Kitas būdas – abscisių ašį nukreipti pastoviai kryptimi taip, kad kūno sukimosi ašis būtų pasvirusi tik į vieną koordinačių ašį, pavyzdžiui, abscisių. Šiame darbe būtent toks metodas yra taikomas tolimesniems formuliu išvedimams.

Dar vienas svarbus parametras yra Saulės padėtis koordinačių plokštumoje. Įsivaizduokite, stebėtojas juda Saulės sistemos kūno atžvilgiu, o pastarasis dar juda Saulės atžvilgiu. Užrašyti

stebėtojo judėjimo lygtį Saulės atžvilgiu nėra sudėtinga, tačiau ją pritaikyti tolimesniems skaičiavimas yra nelengva. Kita vertus, tokį procesą galima supaprastinti pritaikant geocentrinį modelį, kuris teigia, kad visi kūnai skrieja aplink Žemę. Kadangi yra analizuojama tik vieno objekto sąryšis su Saule, todėl tokia prielaida rezultatų nekeičia.

Tolimesnių formulių išvedimas remiasi 1.5 paveikslo (b) ir (c) atvejais, kuriuos sujungus į vieną taip, kad (b) atvejis rodytų stebėtojo, o (c) – Saulės judėjimą, galima gauti atitikmenį (d) atvejui. Pastarasis yra unikalus tuo, kad pašalinus nereikalingus parametrus galima gauti bet kurį kitą 1.5 paveiksle pavaizduotą atvejį. Taigi (b) atveju stebėtojo judėjimo lygtis yra užrašoma taip:

$$\begin{cases} x = R \cos \phi \cos \beta \\ y = R \cos \phi \sin \beta \\ z = R \sin \phi \end{cases} \quad (1.15)$$

Čia: R – Saulės sistemos kūno arba stebėtojo orbitos spindulys, m;
 ϕ – stebėtojo geografinė platumą (orbita skriejančiam objektui $\phi = 0^\circ$), °;
 β – Saulės sistemos kūno arba stebėtojo orbitos rotacinis kampas, °.

Kai Saulės sistemos kūno sukimosi ašis yra pakrypusi į orbitos plokštumą bei taikomas geocentrinis modelis, Saulė vienos siderinės paros laikotarpiu ir pakyla virš, ir nusileidžia žemiau horizonto plokštumos. Toks Saulės judėjimas užrašomas apskritimo, statmeno sukimosi ašiai, lygtimi. Apskritiminių judėjimas gali būti perrašomas elipsiniu jo spindulį išreiškiant (1.12) lygtimi. Pritaikius sąlygą, kad sukimosi ašis yra pasvirusi tik į abscisių ašį, ji užrašoma lygtimi:

$$\begin{cases} x = t \cos \epsilon \\ y = 0 \\ z = t \sin \epsilon \end{cases} \quad (1.16)$$

Čia: t – kintamasis;
 ϵ – Kūno sukimosi arba stebėtojo orbitos ašies posvyris į sukimosi aplink Saulę ašį, °.

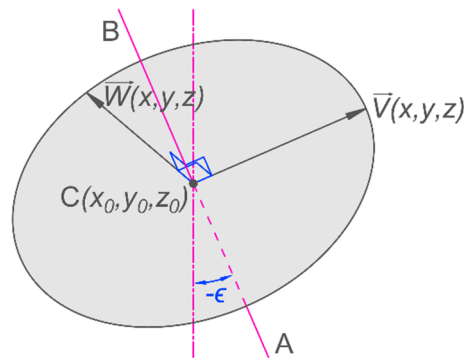
Turint sukimosi ašies lygtį galima surasti jai statmeno apskritimo lygtį. Remiantis [21] literatūros šaltiniu pastaroji gali būti užrašyta pagal (1.17) formulę:

$$\begin{cases} x = x_0 + r \cdot \|\vec{V}_x\| \cos \beta + r \cdot \|\vec{W}_x\| \sin \beta \\ y = y_0 + r \cdot \|\vec{V}_y\| \cos \beta + r \cdot \|\vec{W}_y\| \sin \beta \\ z = z_0 + r \cdot \|\vec{V}_z\| \cos \beta + r \cdot \|\vec{W}_z\| \sin \beta \end{cases} \quad (1.17)$$

Čia: x_0, y_0 ir z_0 apskritimo centro koordinatės;
 r – apskritimo spindulys, m;
 \vec{V} ir \vec{W} – vienetiniai vektoriai, statmeni kūno sukimosi ašiai;
 β – Saulės sistemos kūno arba stebėtojo orbitos rotacinis kampas, $^\circ$.

Rotacinis kampas β parodo koku kampu yra pasisukęs kūnas jo siderinės paros metu. Kadangi kiekvienas Saulės sistemos kūnas aplink savo ašį apsisuka per skirtingą laiko tarpą, todėl pasisukimui naudoti valandinį kampą, įprastą naudoti Žemėje, nėra patogu, nes vienos valandos kampas kiekvienam iš kūnų atitinka skirtingą vertę laipsniais. Pavyzdžiui, vienos valandos kampas Merkurijaus planetai atitinka $360^\circ/1\,407,5 = 0,255\,77^\circ$ rotacinio kampo, o Žemės planetai – $360^\circ/365,26 = 0,985\,60^\circ$. Vis dėlto esant poreikiui rotacinį kampą β galima pakeisti valandiniu kampu H , kurio vertės tam tikriems Saulės sistemos kūnams yra pateiktos 1.2 lentelėje.

(1.16) lygtyje panaudoti \vec{V} ir \vec{W} vienetiniai vektoriai yra naudojami tik sudarant apskritimo lygtį. Jie abu privalo būti statmeni tiek vienas kitam, tiek kūno sukimosi ašiai su minuso ženklu (1.6 pav.) Paprasčiausias būdas yra juos nukreipti x ir y ašių kryptimis, tada jie užrašomi kaip: $\vec{V} = (\cos \epsilon, 0, \sin \epsilon)$ ir $\vec{W} = (0, 1, 0)$. Jei vieno iš šių vektorių absoliutus dydis (ilgis) skiriasi nuo kito, tada pagal (1.16) lygtį gauta figūra bus ne apskritimas, bet elipsė.



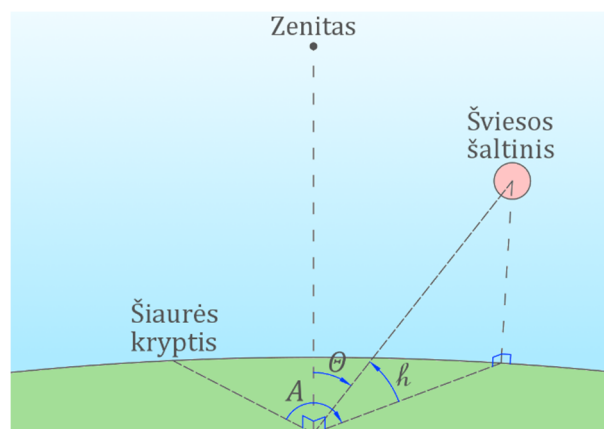
1.6 pav. Tiesiai AB statmenas apskritimas

Paskutiniai nežinomieji (1.17) lygtyje yra apskritimo spindulys r ir jo centro C koordinatės. Kadangi lygtims išvesti yra taikomas geocentrinis modelis, todėl taškas C yra koordinatinių plokštumos pradžioje, nes Saulė sukasi aplink dangaus kūno masės centrą $O(0; 0; 0)$. Spindulys r yra lygus atstumui nuo Saulės iki analizuojamo dangaus kūno ir apskaičiuojamas pagal (1.12) išraišką, tačiau paminėtina, kad šiame darbe nuotolis iki Saulės žymimas raide l . Turint reikiamus duomenis užrašoma lygtis Saulės judėjimui aplink dangaus kūną.

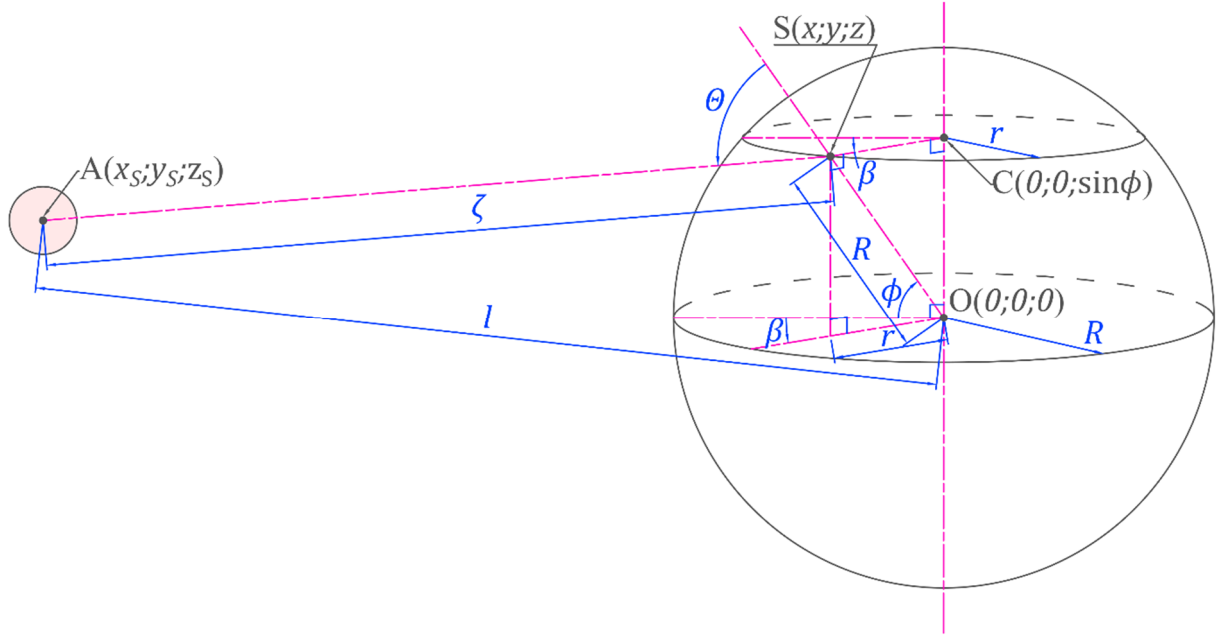
$$\begin{cases} x_S = l \cos \epsilon \cos \alpha \\ y_S = l \sin \alpha \\ z_S = l \sin \epsilon \cos \alpha \end{cases} \quad (1.18)$$

Saulės padėtis dangaus skliaute dažniausiai užrašoma aukščio ir azimuto kampais, žymimais atitinkamai h ir A (1.7 pav.) Azimutas yra kampas tarp krypties į šiaurę ir horizonto statmens, kertančio stebimą dangaus kūną, matuojant rytų kryptimi (pagal laikrodžio rodyklę) [22]. Saulės aukščio kampas nurodo, koku kampu horizonto statmenyje yra pakilusi Saulė. Šis parametras niekada nėra didesnis nei 90° . Jei Saulė nuo horizonto pakilusi 90° kampu, vadinasi, ji yra Zenite. Zenitu vadinamas taškas, esantis priešingoje nei gravitacijos jėgų kryptis, pusėje. Buitinėje kalboje jis apibūdinamas kaip taškas, esantis virš stebėtojo [23]. Pačiame šiaurės ašigalyje stebėtojas zenito taške matytų šiaurinę žvaigždę, tačiau svarbu nepamiršti, kad dangaus kūnams zenitu vadinamas jų aukščiausias taškas danguje. Azimuto, Saulės altitudės (aukščio) bei zenito kampai pavaizduoti 1.7 paveiksle.

Minėtieji Saulės aukščio ir azimuto kampai naudotini tik tada, kai stebėtojas yra ant dangaus kūno paviršiaus, ir nenaudotini, jei stebėtojas yra virš kūno paviršiaus ar aplink jį skrieja orbita. Pastaruoju atveju geografinio ir matematinio horizontų kryptys yra nevienodos. Geografinio horizonto kryptis yra liestinė dangaus kūno paviršiui, tačiau matematinio horizonto kryptis yra statmena zenito kryptiai. Geografinė ir matematinė šiaurės kryptys taip pat nevienodos esant virš kūno paviršiaus, be to, kosminiam aparatui skriejant poliarinėje orbitoje (statmenoje pusiauju plokštumai) geografinė šiaurės kryptis tam tikru laiko momentu yra nukreipta matematine pietų kryptimi. Dėl pastarųjų priežasčių Saulės padėtį dangaus skliaute tikslingiau užrašyti rotaciniu ir zenitiniu kampais, atitinkamai β ir θ . Pastarasis bei Saulės aukščio kampas susieti lygybe: $h = 90^\circ - \theta$.



1.7 pav. Azimuto, zenito ir altitudės kampai



1.8 pav. Brėžinys, zenitiniam kampui surasti

Remiantis 1.8 paveikslu, (1.15) ir (1.18) judėjimo lygtimis bei pritaikant trigonometrines formules, randama zenitinio kampo išraiška:

$$l^2 = \zeta^2 + R^2 - 2\zeta R \cos(180^\circ - \theta)$$

$$\cos \theta = \frac{l^2 - \zeta^2 - R^2}{2\zeta R}$$

Atstumas ζ apskaičiuojamas tokiu būdu:

$$\zeta^2 = (x - x_{[S]})^2 + (y - y_{[S]})^2 + (z - z_{[S]})^2$$

$$\zeta^2 = x^2 - 2xl \cos \epsilon \cos \alpha + l^2 \cos^2 \epsilon \cos^2 \alpha + y^2 - 2yl \sin \alpha + l^2 \sin^2 \alpha + z^2 - 2zl \sin \epsilon \cos \alpha + l^2 \sin^2 \epsilon \cos^2 \alpha$$

$$\zeta^2 = x^2 + y^2 + z^2 - 2l(x \cos \epsilon \cos \alpha + y \sin \alpha + z \sin \epsilon \cos \alpha) + l^2(\cos^2 \alpha (\cos^2 \epsilon + \sin^2 \epsilon) + \sin^2 \alpha)$$

$$\zeta^2 = R^2 - 2l(x \cos \epsilon \cos \alpha + y \sin \alpha + z \sin \epsilon \cos \alpha) + l^2(\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha)$$

$$\zeta^2 = R^2 - 2lR(\cos \phi \cos \epsilon \cos \beta \cos \alpha + \cos \phi \sin \beta \sin \alpha + \sin \phi \sin \epsilon \cos \alpha) + l^2$$

$$\zeta = \sqrt{R^2 - 2lR(\cos \phi \cos \epsilon \cos \beta \cos \alpha + \cos \phi \sin \beta \sin \alpha + \sin \phi \sin \epsilon \cos \alpha) + l^2}$$

Tada:

$$\cos \theta = \frac{l^2 - R^2 - R^2 + 2lR(\cos \phi \cos \epsilon \cos \beta \cos \alpha + \cos \phi \sin \beta \sin \alpha + \sin \phi \sin \epsilon \cos \alpha) - l^2}{2R\sqrt{R^2 - 2lR(\cos \phi \cos \epsilon \cos \beta \cos \alpha + \cos \phi \sin \beta \sin \alpha + \sin \phi \sin \epsilon \cos \alpha) + l^2}}$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{l(\cos \phi \cos \epsilon \cos \beta \cos \alpha + \cos \phi \sin \beta \sin \alpha + \sin \phi \sin \epsilon \cos \alpha) - R}{\sqrt{R^2 - 2lR(\cos \phi \cos \epsilon \cos \beta \cos \alpha + \cos \phi \sin \beta \sin \alpha + \sin \phi \sin \epsilon \cos \alpha) + l^2}} \right)$$

Išvedime naudojamos (1.15) ir (1.18) formulės galioja tik tada, kai esant $\alpha = 0$ (afelyje) kartu galioja ir sąlyga, kad sukimosi ašis yra pasvirusi tik į abscisių ašį, nukreiptą Saulės kryptimi. Pastarasis atvejis įvyksta viename iš saulėgrįžos⁶ taškų, tačiau jos ir maksimalaus nuotolio iki Saulės laiko momentai nesutampa, todėl būtina įvesti α_0 parametą, kuris šią paklaidą pašalintų. Pavyzdžiui, Žemė 2017-aisiais metais afelyje bus liepos 3 dieną 20h. 11min. UTC laiku, bet saulėgrįža įvyks birželio 21d. 04h. 24min [24, 25]. Šių laiko momentų skirtumas yra 12d. 15h. ir 47min., atitinkantis $\alpha_0 = 12,476^\circ$ kampą. Kiekvienais metais tiek saulėgrįžos, tiek afelio datos yra skirtingos, todėl α_0 turi būti apskaičiuojamas iš naujo. Šiame darbe remiamasi tik 2017-ųjų metų duomenimis. Paminėtina ir tai, kad kūnui sukantis aplink savo ašį, jis ir toliau skrieja aplink Saulę, todėl α parametą būtina papildyti santykiu β/T_{dSi} , kur T_{dSi} vienerių metų trukmė siderinėmis (žvaigždinėmis) dienomis. Prieš tai išvestą išraišką pakoregavus pagal minėtas sąlygas, gaunama:

$$\zeta = \sqrt{R^2 - 2lR(\cos \phi \cos \epsilon \cos \beta \cos \tilde{\alpha} + \cos \phi \sin \beta \sin \tilde{\alpha} + \sin \phi \sin \epsilon \cos \tilde{\alpha}) + l^2} \quad (1.19)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{l(\cos \phi \cos \epsilon \cos \beta \cos \tilde{\alpha} + \cos \phi \sin \beta \sin \tilde{\alpha} + \sin \phi \sin \epsilon \cos \tilde{\alpha}) - R}{\sqrt{R^2 - 2lR(\cos \phi \cos \epsilon \cos \beta \cos \tilde{\alpha} + \cos \phi \sin \beta \sin \tilde{\alpha} + \sin \phi \sin \epsilon \cos \tilde{\alpha}) + l^2}} \right) \quad (1.20)$$

$$\tilde{\alpha} = \alpha + \alpha_0 + \frac{\beta}{T_{dSi}} \quad (1.21)$$

1.1.4. Orbitinė naktis

Kosminiam aparatui skriejant orbitoje jis gali atsidurti padėtyje, kurioje jį nuo Saulės užstoja kūnas, aplink kurį skriejama, o visas laikas, išbūtas kūno šešėlyje, vadinamas orbitine naktimi. Tokia naktis nebūtinai yra pastovios trukmės. 1.9 paveiksle pavaizduoti du atvejai, kuriuose orbitinės nakties trukmė yra skirtinga tam tikrose orbitos aplink Saulę arba dangaus kūną atkarpos. (a) atveju (skriejant elipsine orbita) atkarpoje AB kampinis kosminio aparato greitis yra didesnis nei atkarpoje CD, todėl kūno šešėlyje išbūtas laikas yra trumpesnis. Kuo orbita elipsiškesnė, tuo kosminio aparato kampinių greičių skirtumas perihelio ir afelio taškuose yra didesnis, o šis greitis apskaičiuojamas

⁶ Saulėgrįža (solsticija) tai laiko momentai žiemą ir vasarą, kai Saulė, slinkdama ekliptika, atsiduria taškuose, labiausiai nutolusiuose nuo dangaus pusiaujo. Nuo jų Saulė pradeda grįžti atgal (artėti prie dangaus pusiaujo).

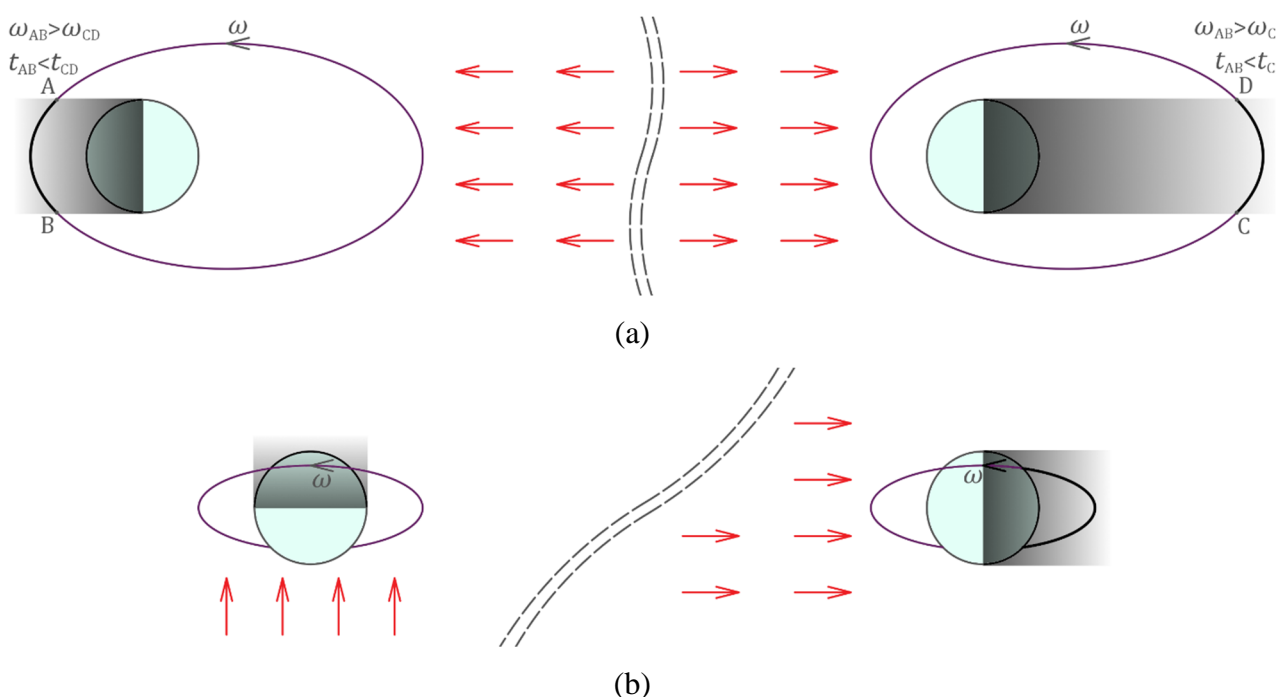
pagal (1.23) formulę [26]. (b) atveju dirbtinis palydovas skrieja poliarine orbita, todėl orbitinė naktis negalima, kai jo orbitos ašies kryptis yra lygiagreti spindulių kryptiai.

$$v_o = \sqrt{\frac{GM_{[SSK]}}{R_o}} \quad (1.23)$$

Čia: G – Gravitacinė konstanta. $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 / (\text{s}^2 \cdot \text{kg})$;

$M_{[SSK]}$ – Saulės sistemos kūno, aplink kurį skriejama, masė, kg;

R_o – orbitos spindulys, m.



1.9 pav. Skirtingos trukmės orbitinių naktų atvejai ir jų veiksniai: (a) orbitos elipsiškumas, (b) orbitos posvyris

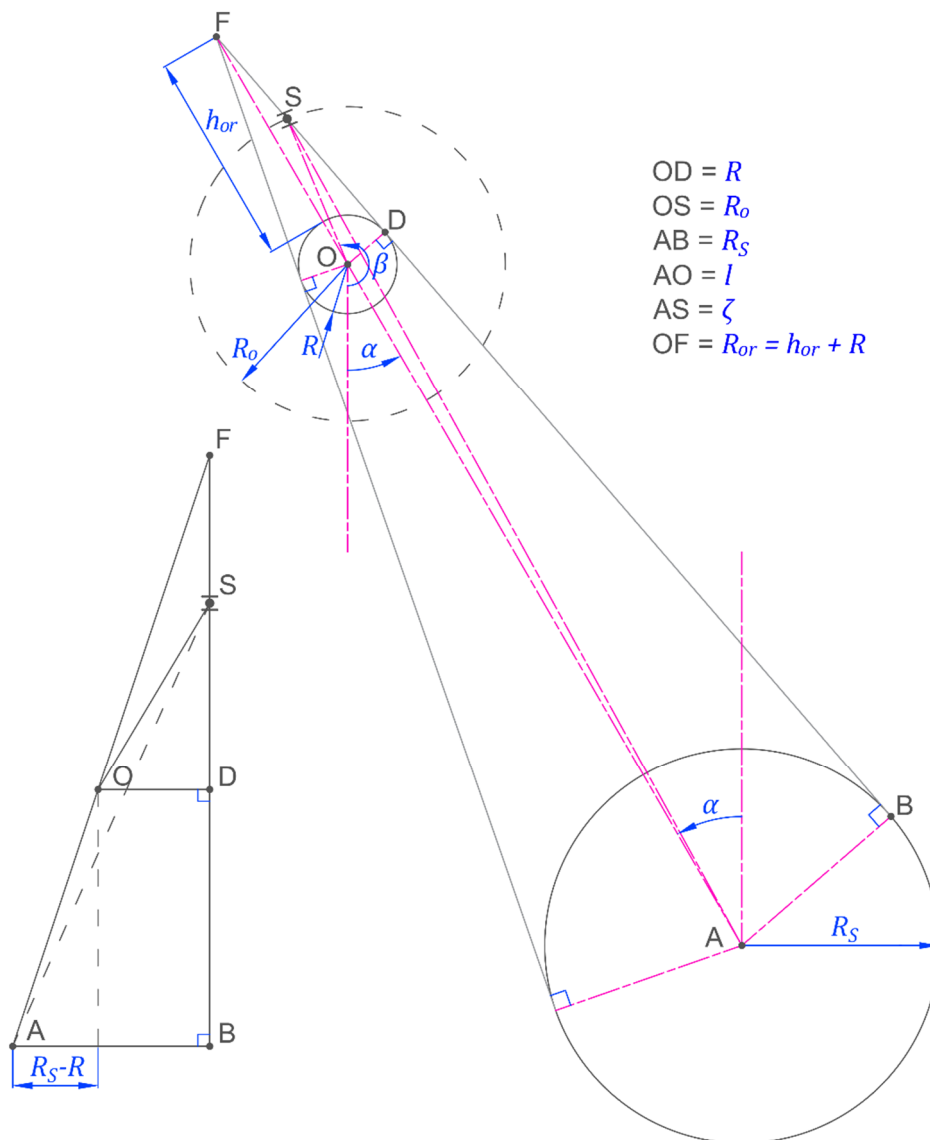
Stebėtojai esant aplink Saulės sistemos kūną skriejančiame erdvėlaivyje, jis Saulę matytų visą laiką, išskyrus tada, kai kūnas ją užstoja. Ribinis atvejis įvyksta, kai Saulės kraštas matomas kūno horizonto kryptimi. Tokiu atveju žvilgsnio kryptis yra abiejų kūnų liestinė. Apvalių kūnų liestinės yra statmenos jų spinduliui, todėl žinant kūno orbitos aplink Saulę bei objekto orbitos aplink šį kūną parametrus, galima išvesti matematinę išraišką, aprašančią, kada objektas yra kūno šešėlyje. Matematinės išraiškos išvedimas remiasi 1.10 paveikslu.

Atstumas tarp stebėtojo, skriejančio orbitoje aplink Saulės sistemos kūną, ir Saulės apskaičiuojamas pagal (1.19) formulę, kurioje $\phi = 0$, o $R = R_o$ (orbitos spindulys), todėl:

$$\zeta = \sqrt{R_o^2 - 2lR_o(\cos \epsilon \cos \beta \cos \tilde{\alpha} + \sin \beta \sin \tilde{\alpha}) + l^2} \quad (1.24)$$

Kai orbita aplink Saulės sistemos kūną skriejantis objektas nuo Saulės matomas šio kūno horizonto kryptimi, atstumas ζ yra ribinis (ζ_{rib}). Jei objekto nuotolis nuo Saulės yra didesnis už ribinį – jis atsiduria kūno šešėlyje. Nelygybė, aprašanti, kada objektas yra orbitinėje naktyje, užrašoma taip:

$$\zeta \geq \zeta_{rib} \quad (1.25)$$



1.10 pav. Brėžinys, orbitinės nakties sąlygai išvesti

Remiantis 1.10 paveikslu, kuriame taškai S, O, A, B, D ir F yra vienoje plokštumoje, o R_S reiškia Saulės spindulį, ζ_{rib} lygtis surandama taip:

$$\begin{aligned}
\zeta_{rib} &= \sqrt{SB^2 + R_S^2} = \sqrt{(SD + DB)^2 + R_S^2} \\
\zeta_{rib} &= \sqrt{\left(\sqrt{R_o^2 - R^2} + \sqrt{l^2 - (R_S - R)^2}\right)^2 + R_S^2} \\
\zeta_{rib} &= \sqrt{R_o^2 - R^2 + l^2 - R_S^2 + 2R_S R - R^2 + \sqrt{(R_o^2 - R^2)(l^2 - (R_S - R)^2)} + R_S^2} \\
\zeta_{rib} &= \sqrt{R_o^2 + l^2 + 2\left(\sqrt{(R_o^2 - R^2)(l^2 - (R_S - R)^2)} + R_S R - R^2\right)} \quad (1.26)
\end{aligned}$$

Tada (1.24) ir (1.26) formules įstačius į (1.25) lygtį ir abi šios išraiškos puses pakėlus kvadratu, gaunama:

$$\begin{aligned}
R_o^2 - 2lR_o(\cos \epsilon \cos \beta \cos \tilde{\alpha} + \sin \beta \sin \tilde{\alpha}) + l^2 &\geq R_o^2 + l^2 + 2\left(\sqrt{(R_o^2 - R^2)(l^2 - (R_S - R)^2)} + R_S R - R^2\right) \\
2lR_o(\cos \epsilon \cos \beta \cos \tilde{\alpha} + \sin \beta \sin \tilde{\alpha}) &\leq 2\left(R^2 - R_S R - \sqrt{(R_o^2 - R^2)(l^2 - (R_S - R)^2)}\right) \\
\cos \epsilon \cos \beta \cos \tilde{\alpha} + \sin \beta \sin \tilde{\alpha} &\leq \frac{R^2 - R_S R - \sqrt{(R_o^2 - R^2)(l^2 - (R_S - R)^2)}}{lR_o} \quad (1.27)
\end{aligned}$$

Orbita aplink Saulės sistemos kūną skriejančio objekto išskriejimo iš ir įskriejimo į kūno šešėlį (aušros ir saulėlydžio) orbitinių kampų matematinė lygtis negali būti surasta net galingų matematinio modeliavimo platformų, todėl (1.27) sąlyga turi būti tikrinama kiekvienu atveju.

Suradus objekto orbitinius saulėlydžio ir aušros kampus, atitinkamai β_s ir β_a , gali būti surastas ir objekto laikas, praleistas orbitinėje naktyje. Šis laikas lygus orbitos lanko, tarp gautųjų taškų, ilgio ir orbitinio greičio v_o santykiui. Apskritiminės orbitos atveju v_o yra pastovus, o lanko ilgis apskaičiuojamas paprasta matematine formule – $\mathcal{L} = R_o(\beta_a - \beta_s)$, kai β matuojamas radianais. Apskritiminės orbitos atveju nakties trukmė sekundėmis apskaičiuojama naudojantis (1.28) lygtimi. Elipsinės orbitos atveju lanko ilgis surandamas skaitiniu metodu integruojant apibrėžtinį integralą, be to, orbitinis greitis kiekviename orbitos taške yra skirtingas, todėl visame orbitinės nakties lanko ilgyje taip pat apskaičiuojamas integruojant skaitiniu metodu. Dėl skaičiavimų sudėtingumo elipsinės kosminių aparatų orbitos šiame darbe nėra analizuojamos.

$$t_{ON} = \frac{\mathcal{L}}{v_o} = \sqrt{\frac{R_o^3(\beta_a - \beta_s)^2}{GM_{[SSK]}}} \quad (1.28)$$

Paminėtina, kad Saulė yra didesnį už bet kurį kitą Saulės sistemos kūną, todėl pastarojo šešėlis nėra begalinis. Remiantis 1.10 paveikslu ribinis objekto orbitos spindulys R_{or} , kurį viršijus, objektas į kūno šešėlį nebepakliūva, apskaičiuojamas pagal (1.29) formulę.

$$R_{or} = \frac{Rl}{R_s - R} \quad (1.29)$$

1.2. Atmosferos įtaka ją kertančiai šviesai

1.2.1. Atmosferinė ekstinkcija

Saulės šviesai kertant atmosferą, jos srautas silpnėja. Tai vyksta dėl dviejų pagrindinių optinių prižasčių – absorbcijos ir sklaidos. Kuo ilgesnis kelias, kuriuo šviesa keliauja per atmosferą, tuo šie procesai yra stipresni. Dėl šios priežasties dangaus kūnai ties horizontu yra ne tokie ryškūs nei savo aukščiausiam dangaus taške – zenite. Saulės šviesos srauto silpnėjimo Žemėje, taip pat ir kitose planetose, turinčiose atmosferą, reiškinys yra vadinamas atmosferine ekstinkcija⁷ [27, 28]. Ji gali būti ne tik atmosferinė ir bendroju atveju yra vadinama *optine ekstinkcija* bei aprašoma Bero-Lamberto-Bugerio dėsniu (angl. *Beer-Lambert-Bouguer law*) (1.30). Šis dėsnis aprašo terpės optinį pralaidumą [27]. Optinė ekstinkcija priklauso nuo terpę sudarančių šviesą sugeriančių bei sklaidančių cheminių elementų ar jų junginių (angl. *attenuating species*, toliau – komponentų) koncentracijos ir jų molinio ekstinkcijos koeficiento. Kita Bero-Lamberto-Bugerio dėsnio versija taip pat teigia, kad terpės optinis pralaidumas priklauso nuo komponentų optinio gylio [29].

$$\mathcal{T} = \frac{\Phi}{\Phi_0} = e^{-\tau} = 10^{-A} \quad (1.30)$$

Kur:

$$\tau = \sum_{i=1}^N \tau_i = \sum_{i=1}^N \sigma_i \int_0^l n_i(z) dz \quad (1.31)$$

$$A = \sum_{i=1}^N A_i = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \int_0^l c_i(z) dz \quad (1.32)$$

⁷ Ekstinkcija [lot. ex(s)tinctio — gesinimas], šviesos srauto stiprumo mažėjimas aplinkoje dėl sugėrimo ir sklaidos. Šaltinis: Tarptautinių žodžių žodynas, 1985

Čia: \mathcal{T} – optinis pralaidumas;
 Φ_0 – terpę pasiekiantis spinduliuotės srautas, W;
 Φ – terpę kirtęs spinduliuotės srautas, W;
 τ – optinis gylis;
 A – optinė ekstinkcija;
 N – komponentų skaičius;
 σ_i – i rūšies komponentų ekstinkcijos plotas, m²;
 n_i – i rūšies komponentų koncentracija, m⁻³;
 ε_i – i rūšies komponentų molinis ekstinkcijos koeficientas, m²/mol;
 c_i – molinė i rūšies komponentų koncentracija, mol/m³;
 l – optinio kelio ilgis (šviesos nukeliautas kelias terpėje), m;

Sujungus (1.30), (1.31) ir (1.32), gaunama:

$$\mathcal{T} = e^{-\sum_{i=1}^N \sigma_i \int_0^l n_i(z) dz} = 10^{-\sum_{i=1}^N \varepsilon_i \int_0^l c_i(z) dz} \quad (1.33)$$

ε_i ir σ_i bei n_i ir c_i yra susieti lygybėmis:

$$\varepsilon_i = \frac{N_A}{\ln 10} \sigma_i \Leftrightarrow \sigma_i = \frac{\ln 10}{N_A} \varepsilon_i \quad (1.34)$$

$$c_i = \frac{n_i}{N_A} \Leftrightarrow n_i = N_A c_i \quad (1.35)$$

Čia: N_A – Avogadro konstanta. $N_A = 6,022\,141\,79 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ [30].

Minėtasis Bero-Lamberto-Bugerio dėsnis yra taikomas nehomogeninėms terpėms, tokioms, kaip atmosfera, kurios tankis ir koncentracija kinta šviesos spindulio kelyje. Vientisoms medžiagoms ši dėsnio išraiška yra paprastesnė (1.36), nes joje nelieta integralų [29].

$$\mathcal{T} = e^{-\sum_{i=1}^N \sigma_i n_i l} = 10^{-\sum_{i=1}^N \varepsilon_i c_i l} \quad (1.36)$$

Jei medžiaga yra vienalytė, t.y. sudaryta iš vieno cheminio elemento ar jų junginio, Bero-Lamberto-Bugerio dėsnis tampa dar paprastesnis (1.37), nes jame nelieta sumos operatorių. Tokiu atveju skaičiavimuose dažnai taikomas ir Bugerio dėsnis (angl. *Bouguer's law*) (1.38) [29, 31].

$$\mathcal{T} = e^{-\sigma n l} = 10^{-\varepsilon c l} \quad (1.37)$$

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\alpha l} \quad (1.38)$$

Čia: α – ekstinkcijos koeficientas, m^{-1} .

Bero-Lamberto-Bugerio dėsnis taikomas optiniam atmosferos pralaidumui apskaičiuoti, kadangi šiame darbe analizuojama būtent atmosferos įtaka šviesos srauto stipriui, todėl naudotina yra plačiausioji dėsnio versija, užrašyta (1.33) išraiškoje. Pabrėžtina, kad prieš tai užrašytos formulės galioja tik monochromatinei, t.y. vieno bangos ilgio, šviesai, tačiau žinant heterochromatinės šviesos spektro kompoziciją, ji gali būti pritaikyta kiekvienam bangos ilgiui atskirai.

1.2.2. Optinio kelio ilgis ir oro masė

Šviesa per atmosferą retai sklinda trumpiausiu keliu, lygiu atmosferos storiui h_A , o tokie spinduliai Žemės paviršių pasiekia ne stačiu kampu. Dėl šios priežasties optinio kelio ilgis per atmosferą yra ilgesnis ir bendruoju atveju aprašomas (1.39) formule [29].

$$l = \mathcal{M} h_A \quad (1.39)$$

Čia: l – optinio kelio ilgis, m;

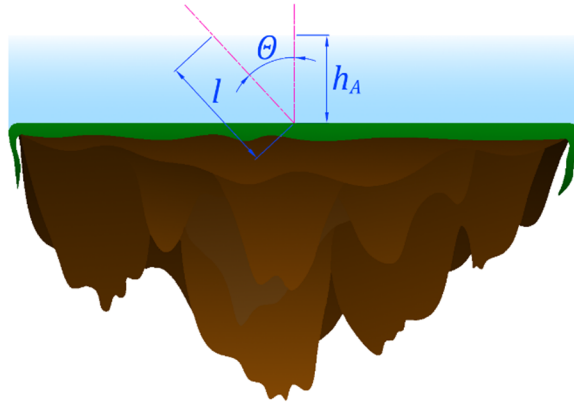
\mathcal{M} – oro masė;

h_A – minimalus optinio kelio ilgis – atmosferos storis zenito kryptimi, m.

Oro mase vadinamas dydis, kuris nusako, kiek kartų atmosfera yra storesnė kampu sklindantiems šviesos spinduliams lyginant su sklindančiais zenito kryptimi. (1.39) formulėje matytina, kad optinis kelio ilgis yra tiesiogiai proporcingas oro masės dydžiui ir atmosferos aukščiui. Oro masė kinta nuo kampo tarp zenito ir dangaus šviesulio (zenitinio kampo) θ . Pats paprasčiausias šių dydžių ryšys aprašomas sekanto funkcija (1.40) (žr. 1.11 pav.), kai Žemė laikoma plokščia ir begalinio ilgio. Vis dėlto Žemės, taip pat ir kitų planetų atmosfera horizonto kryptimi nėra begalinė, todėl esant dideliame zenitiniame kampui sekanto funkcija tampa nebeteisinga. Paprastai ja galima gauti patikimus rezultatus, kol θ neviršija 60° [27].

$$\mathcal{M} = \frac{l}{h_A} = \frac{h_A}{h_A \cos \theta} = \cos^{-1} \theta$$

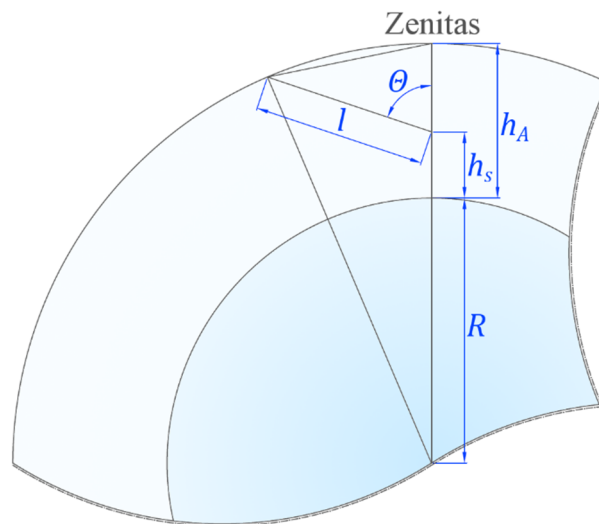
$$\mathcal{M} = \sec \theta \quad (1.40)$$



1.11 pav. Optinio kelio ilgio l , zenitinio kampo θ ir atmosferos aukščio h_A sąryšis

Anksčiau paminėta, kad (1.40) išraiška yra netiksli esant dideliame zenitiniame kampui θ , ypač, kai jis lygus 90° , kada gaunama begalybė, nors realybėje \mathcal{M} būtų apytiksliai lygus 39. Be to, ši formulė neaprašo aukščio, kuriame yra stebėtojas. Universaliosios oro masės formulės, atsižvelgiant į minėtas pastabas, išvedimas pateikiamas toliau.

Laikant, kad stebėtojas yra aukštyje h_s ant R spindulio dangaus kūno, turinčio h_A storio atmosferą, kaip pavaizduota 1.12 pav., oro masė apskaičiuojama pagal išraišką $\mathcal{M} = l/h_A$.



1.12 pav. Geometrinis brėžinys atmosferos optinio kelio ilgiui ir oro masės dydžiui apskaičiuoti

Pagal kosinusų teoremą:

$$\begin{aligned}
 (R + h_A)^2 &= (R + h_s)^2 + l^2 - 2l(R + h_s) \cos(180^\circ - \theta) \\
 R^2 + 2Rh_A + h_A^2 &= R^2 + 2Rh_s + h_s^2 + l^2 + 2l(R + h_s) \cos \theta \\
 l^2 + 2l(R + h_s) \cos \theta + (2Rh_s + h_s^2 - 2Rh_A - h_A^2) &= 0
 \end{aligned}$$

Įvedant keitinius: $A = 1$, $B = 2(R + h_s) \cos \theta$ ir $C = 2Rh_s + h_s^2 - 2Rh_A - h_A^2$, sprendžiama kvadratinė lygtis:

$$l = \frac{\pm \sqrt{B^2 - 4AC} - B}{2A}$$

$$l = \frac{\pm \sqrt{4(R + h_s)^2 \cos^2 \theta - 4(2Rh_s + h_s^2 - 2Rh_A - h_A^2)} - 2(R + h_s) \cos \theta}{2}$$

Neigiama optinio kelio ilgio reikšmė neturi fizikinės prasmės, todėl ženklas prieš kvadratinę šaknį yra teigiamas. Sutvarkius išraišką, gaunama:

$$l = \sqrt{(R + h_s)^2 \cos^2 \theta + 2R(h_A - h_s) - h_s^2 + h_A^2} - (R + h_s) \cos \theta \quad (1.41)$$

Gautoji (1.41) išraiška aprašo tik optinio kelio ilgį. Norint apskaičiuoti oro masę, abi išraiškos pusės padalinamos iš h_A :

$$\mathcal{M} = \frac{l}{h_A} = \frac{\sqrt{(R + h_s)^2 \cos^2 \theta + 2R(h_A - h_s) - h_s^2 + h_A^2} - (R + h_s) \cos \theta}{h_A}$$

$$\mathcal{M} = \sqrt{\left(\frac{R}{h_A} + \frac{h_s}{h_A}\right)^2 \cos^2 \theta + 2\frac{R}{h_A}\left(1 - \frac{h_s}{h_A}\right) - \left(\frac{h_s}{h_A}\right)^2 + 1} - \left(\frac{R}{h_A} + \frac{h_s}{h_A}\right) \cos \theta \quad (1.42)$$

Arba:

$$\mathcal{M} = \sqrt{(\check{R} + \check{h}_s)^2 \cos^2 \theta + 2\check{R}(1 - \check{h}_s) - \check{h}_s^2 + 1} - (\check{R} + \check{h}_s) \cos \theta \quad (1.43)$$

Čia: $\check{R} = R/h_A$;

$\check{h}_s = h_s/h_A$.

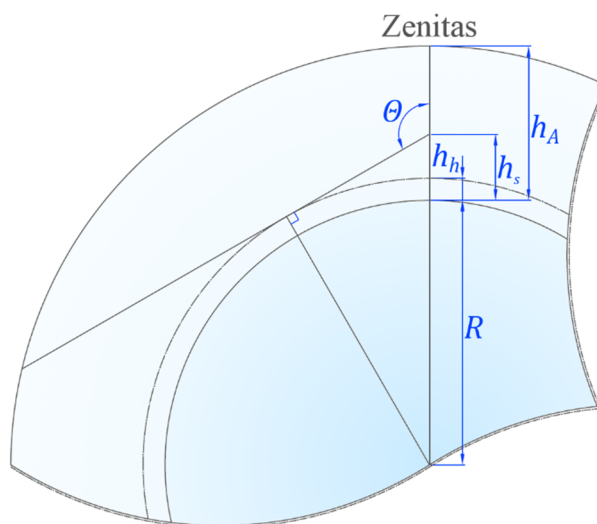
Paminėtini trys išskirtiniai atvejai: kai stebėtojas yra jūros lygyje (1.44), kai zenitinis kampas lygus 90° (1.45) ir kai stebėtojas yra jūros lygyje bei zenitinis kampas lygus 90° (1.46).

$$\mathcal{M} = \sqrt{\check{R}^2 \cos^2 \theta + 2\check{R} + 1} - \check{R} \cos \theta \quad (1.44)$$

$$\mathcal{M} = \sqrt{2\check{R}(1 - \check{h}_s) - \check{h}_s^2 + 1} \quad (1.45)$$

$$\mathcal{M} = \sqrt{2\check{R} + 1} \quad (1.46)$$

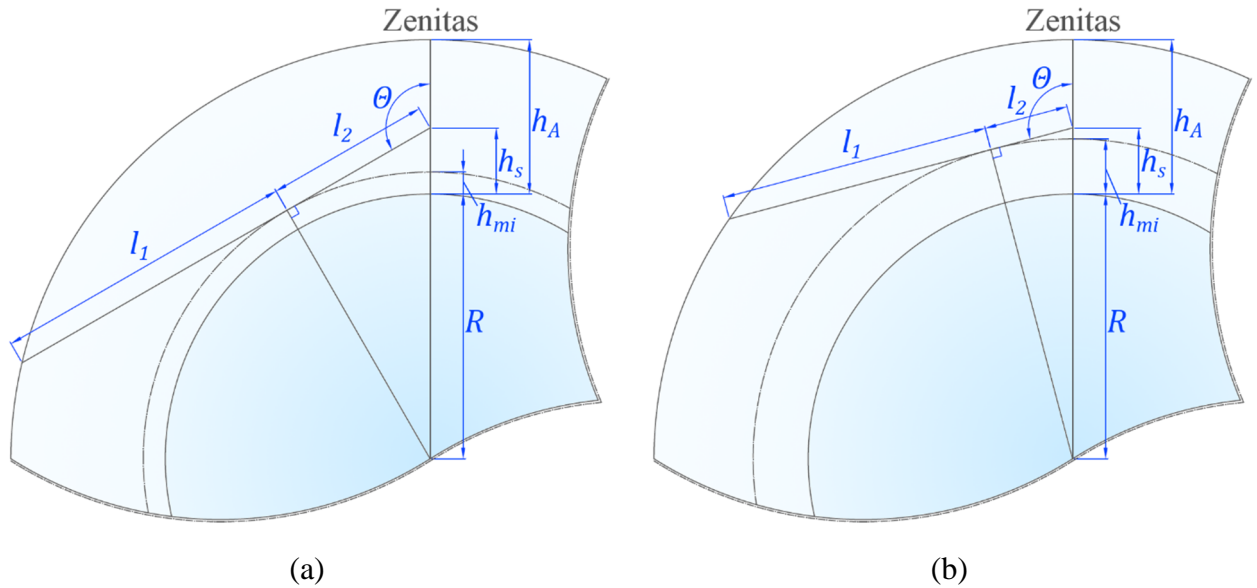
Pastebėtina, kad maksimalus zenitinis kampas taip pat priklauso nuo stebėtojo altitudės. Analizuojant 1.13 pav. galima išvesti išraišką maksimaliam θ apskaičiuoti. θ_{max} gaunamas, kai saulės šviesa stebėtoją pasiekia horizonto kryptimi, tada spindulių kryptis yra statmena planetos spinduliui, tačiau paminėtina, kad horizontas ne visada yra jūros lygyje. Matomojo horizonto aukštis virš jūros lygio pažymimas h_h , tada:



1.13 pav. Geometrinis brėžinys maksimaliam zenitiniam kampui apskaičiuoti

$$\begin{aligned} \sin(180^\circ - \theta_{max}) &= \frac{R + h_h}{R + h_A} \\ 180^\circ - \theta_{max} &= \sin^{-1}\left(\frac{R + h_h}{R + h_A}\right) \\ \theta_{max} &= 180^\circ - \sin^{-1}\left(\frac{R + h_h}{R + h_A}\right) \end{aligned} \quad (1.47)$$

Iš 1.13 paveikslo matytina, kad $\theta > 90^\circ$ atveju, šviesos spindulio kelią galima išskaidyti į dvi dalis. Šiuo atveju šviesa keliauja atmosfera jos tankėjimo kryptimi iki liestine pasiekia horizontą, o toliau spindulio kelyje atmosfera retėja iki jis pasiekia stebėtoją. Šviesos spindulio dedamųjų dydžiai apskaičiuojami remiantis 1.14 paveikslo (a) ir (b) dalimis.



1.14 pav. Geometriniai brėžiniai atmosferos optinio kelio ilgiui ir oro masės dydžiui, kai zenitinis kampas yra didesnis nei 90° , apskaičiuoti

Minimalus spindulio pasiekiamas aukštis virš jūros lygio h_{mi} ir atstumas l_2 apskaičiuojami taip:

$$R + h_{mi} = (R + h_s) \sin(180^\circ - \theta) = (R + h_s) \sin \theta$$

$$h_{mi} = (R + h_s) \sin \theta - R = R(\sin \theta - 1) + h_s \sin \theta$$

$$h_{mi} = R(\sin \theta - 1) + h_s \sin \theta \quad (1.48)$$

$$l_2 = (R + h_s) \cos(180^\circ - \theta) = -(R + h_s) \cos \theta \quad (1.49)$$

Dydis l_1 apskaičiuojamas naudojantis 1.45 lygtimi, kai zenitinis kampas lygus 90° ir stebėtojo aukštis $h_s = h_{mi}$:

$$l_1 = h_A \mathcal{M} = h_A \sqrt{2 \frac{R}{h_A} \left(1 - \frac{h_{mi}}{h_A}\right) - \left(\frac{h_{mi}}{h_A}\right)^2 + 1}$$

$$l_1 = \sqrt{2R(h_A - h_{mi}) + h_A^2 - h_{mi}^2} \quad (1.50)$$

$$l_1 = \sqrt{2R(h_A - R \sin \theta + R - h_s \sin \theta) + h_A^2 - ((R \sin \theta - R) + h_s \sin \theta)^2}$$

$$l_1 = \sqrt{2Rh_A + R^2 + h_A^2 - R^2 \sin^2 \theta - 2Rh_s \sin^2 \theta - h_s^2 \sin^2 \theta}$$

$$l_1 = \sqrt{R^2 \cos^2 \theta + 2R(h_A - h_s \sin^2 \theta) + h_A^2 - h_s^2 \sin^2 \theta} \quad (1.51)$$

Turint l_1 ir l_2 užrašoma (1.52) oro masės formulė, pritaikyta didesniams, nei 90° zenitiniams kampui:

$$\mathcal{M} = \frac{l_1 + l_2}{h_A} = \sqrt{\left(\frac{R}{h_A}\right)^2 \cos^2 \theta + 2\frac{R}{h_A}\left(1 - \frac{h_s}{h_A} \sin^2 \theta\right) + 1 - \left(\frac{h_s}{h_A}\right)^2 \sin^2 \theta} - \left(\frac{R}{h_A} + \frac{h_s}{h_A}\right) \cos \theta$$

$$\mathcal{M} = \sqrt{\check{R}^2 \cos^2 \theta + 2\check{R}(1 - \check{h}_s \sin^2 \theta) - \check{h}_s^2 \sin^2 \theta + 1} - (\check{R} + \check{h}_s) \cos \theta \quad (1.52)$$

Iš trigonometrijos žinoma, kad $\sin^2 \theta = 1 - \cos^2 \theta$, todėl perrašius ir sutvarkius išraišką, gaunama:

$$\mathcal{M} = \sqrt{\check{R}^2 \cos^2 \theta + 2\check{R} - 2\check{R}\check{h}_s + 2\check{R}\check{h}_s \cos^2 \theta - \check{h}_s^2 + \check{h}_s^2 \cos^2 \theta + 1} - (\check{R} + \check{h}_s) \cos \theta$$

$$\mathcal{M} = \sqrt{(\check{R}^2 + 2\check{R}\check{h}_s + \check{h}_s^2) \cos^2 \theta + 2\check{R}(1 - \check{h}_s) - \check{h}_s^2 + 1} - (\check{R} + \check{h}_s) \cos \theta$$

$$\mathcal{M} = \sqrt{(\check{R} + \check{h}_s)^2 \cos^2 \theta + 2\check{R}(1 - \check{h}_s) - \check{h}_s^2 + 1} - (\check{R} + \check{h}_s) \cos \theta$$

Pastebėtina, kad gautoji išraiška yra lygiai tokia pati kaip ir (1.43), todėl ji tinka naudoti esant bet kokio dydžio zenitiniams kampui θ .

Gautąją formulę padauginus iš h_A bei $\cos^2 \theta$ perrašius kaip $(1 - \sin^2 \theta)$, išvedama kompaktiška optinio kelio ilgio homogeninėje nerefrakcinėje atmosferoje lygtis (1.53). Ši lygtis naudojama tolimesnėje analizėje.

$$l = \mathcal{M} h_A = \sqrt{(R + h_s)^2 (1 - \sin^2 \theta) + 2R(h_A - h_s) - h_s^2 + h_A^2} - (R + h_s) \cos \theta$$

$$l = \sqrt{R^2 + 2Rh_s + h_s^2 - (R + h_s)^2 \sin^2 \theta + 2Rh_A - 2Rh_s - h_s^2 + h_A^2} - (R + h_s) \cos \theta$$

$$l = \sqrt{R^2 - (R + h_s)^2 \sin^2 \theta + 2Rh_A + h_A^2} - (R + h_s) \cos \theta$$

$$l = \sqrt{(R + h_A)^2 - (R + h_s)^2 \sin^2 \theta} - (R + h_s) \cos \theta \quad (1.53)$$

- Čia: R – dangaus kūno spindulys, m;
 h_A – kūno atmosferos aukštis virš jūros lygio, m;
 h_s – stebėtojo aukštis virš jūros lygio, m. $h_s \in [0; h_A]$;
 θ – Dangaus šviesulio zenitinis kampas, $^\circ$. $\theta \in [0; \theta_{max}]$;

$$\theta_{max} = 180^\circ - \sin^{-1}((R + h_h)/(R + h_s));$$

h_h – matomojo horizonto aukštis virš jūros lygio, m. $h_h \in [0; h_s]$.

(1.53) lygtis yra kompaktiška ir pakankamai gerai aprašo optinio kelio ilgį, tačiau ji nėra tobula. Iš tikrųjų šviesos spindulys dėl difrakcijos reiškinio atmosfera keliauja ne tiesia, o lenkta trajektorija, todėl šviesulys danguje atrodo aukščiau nei yra iš tikrųjų. Šviesos difrakcija atsiranda dėl atmosferos tankio kitimo spindulio kelyje ir priklauso nuo atmosferos cheminės kompozicijos bei jos tankio, o šis – nuo temperatūros. Norint pritaikyti refrakcijos reiškinį anksčiau išvestoms formulėms, reikalingos specialios matematinės žinios, todėl šiame darbe refrakcija nepaisoma. Svarbiausias parametras – optinė atmosferos ekstinkcija – priklauso nuo spindulio kelio ilgio l bei, taip pat kaip ir optinė refrakcija, – nuo atmosferos tankio ρ arba elementų koncentracijos, todėl sekančiame, 1.2.3, punkte aprašomas jų kitimas ir skaičiavimai.

1.2.3. Atmosferos tankis ir elementų koncentracija

Dar mokyklos fizikos kurse mokoma, kad atmosfera nėra vienodo tankio ir kad šis priklauso nuo aukščio virš jūros lygio. Bendruoju atveju tankis yra aprašomas idealiųjų dujų būsenos lygtimi (1.54), tačiau joje neatsispindi altitudės įtaka. Pastebėtina, kad minėtoje lygtyje yra dvi konstantos – molinė masė M ir idealiųjų dujų konstanta R , o tiek temperatūra, tiek slėgis aprašomi atitinkamai (1.55) ir (1.56) lygtimis [32, 33]. Paminėtina, kad (1.56) lygtis aprašo slėgio kitimą tiek izoterminėje, t.y. kai temperatūra yra pastovi kintančiai altitutei, tiek politropinėje atmosferoje.

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (1.54)$$

$$T = T_b + L_r(z - z_b) \quad (1.55)$$

$$P = \begin{cases} P_b e^{-\frac{g_0 M(z-z_b)}{R \cdot T_b}} & , \text{ kai } L_r = 0 \\ P_b \left(\frac{T_b}{T_b + L_r(z - z_b)} \right)^{\frac{g_0 M}{R \cdot L_r}} & , \text{ kai } L_r \neq 0 \end{cases} \quad (1.56)$$

Čia: P – slėgis, Pa;

M – molinė masė, kg/mol;

R – idealiųjų dujų konstanta. $R = 8,314\ 459\ 848\ \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;

T – absoliučioji temperatūra, K;

z – geopotencialinė altitudė, m;

g_0 – laisvojo kritimo planetos paviršiuje, m/s^2 ;

L_r – temperatūros kitimo koeficientas atmosferos sluoksnio regione r , K/m;

z_b – bazinė atmosferos sluoksnio regiono geopotencialinė altitudė, m;

P_b – atmosferos slėgis aukštyje z_b , Pa;

T_b – temperatūra aukštyje z_b , K.

Iš išraiškos matyti, kad vietoje geometrinės altitudės h (aukščio virš jūros lygio) yra naudojama geopotencialinė altitudė z . Pastaroji yra papildytoji altitudės versija, atsižvelgianti į gravitacijos ir geografinės platumos įtaką. Žemėje šie du dydžiai yra susiję išraiška (1.57):

$$z = \frac{R_{z_p} h}{R_{z_p} + h} \quad (1.57)$$

Čia: R_{z_p} – Žemės spindulys polių (ašigalių) kryptimi. $R_{M_p} = 6\,356\,500$ m.

Pagal Tarptautinės Standartinės Atmosferos (angl. *International Standard Atmosphere*, ISA) modelį apibrėžiama, kad trijų žemiausiųjų Žemės atmosferos sluoksnių – troposferos, stratosferos ir mezosferos, viršutiniai regionai (tropopauzė, stratopauzė ir mezopauzė) yra izoterminiai, t.y. aplinkos temperatūra nekinta nuo altitudės. Likusiuose regionuose temperatūra skirtingais greičiais kinta nuo aukščio virš jūros lygio. 1.3 lentelėje pateikti temperatūros kitimo koeficientai, temperatūra ir slėgis išvardintųjų atmosferos sluoksnių regionuose [34].

1.3 lentelė. Atmosferos sluoksnių regionų temperatūros kitimo bei baziniai parametrai

Sluoksnis ir/ar regionas	Bazinė geopotencialinė altitudė (z_b), m	Temperatūros kitimo koeficientas (L_r), K/m	Bazinė temperatūra (T_b), K	Bazinis atmosferos slėgis (P_b), Pa
Troposfera	0	-0,006 5	292,15 (+19,00°C)	101 325
Tropopauzė	11 000	0	216,65 (-56,50°C)	22 632
Stratosfera	20 000	+0,001 0	216,65 (-56,50°C)	5 474,9
Stratosfera	32 000	+0,002 8	228,65 (-44,50°C)	868,02
Stratopauzė	47 000	0	270,65 (-2,50°C)	110,91
Mezosfera	51 000	-0,002 8	270,65 (-2,50°C)	66,939
Mezosfera	71 000	-0,002 0	214,65 (-58,50°C)	3,956 4
Mezopauzė	84 852	0	186,87 (-86,28°C)	0,373 38

Chemijos mokslas skiria trijų skirtingų rūšių koncentraciją: masės (ρ), tūrio (V^{-1}) ir molinę (c) [35]. Masės koncentracija yra žinoma kaip tankis, tačiau svarbiausia šiame darbe yra molinė

koncentracija, kadangi ji – vienas iš Bero-Lamberto-Bugerio dėsnio parametrų. Molinė koncentracija nurodo medžiagos kiekį n (molių skaičių) tūrio vienetė. Taikant pagrindines chemijos lygtis, molinę koncentraciją galima perrašyti tankio ir molinės masės M santykiu (1.58):

$$c = \frac{n}{V} = \frac{mn}{mV} = \frac{\rho n}{m} = \frac{\rho}{\frac{m}{n}}$$

$$c = \frac{\rho}{M} \quad (1.58)$$

Į (1.59) lygtį įstačius (1.54) išraišką, gaunama:

$$c = \frac{1}{M} \cdot \frac{MP}{RT}$$

$$c = \frac{P}{RT_0} \quad (1.59)$$

Bero-Lamberto-Bugerio dėsnyje koncentracija yra integruojama visame spindulio kelyje per atmosferą, kuris šiame darbe vadinamas optinio kelio ilgiu l . Žinoma, kad optinio kelio ilgis priklauso nuo altitudės, todėl integruojant užrašomas $l(h)$. Remiantis pastarosiomis žiniomis, vidutinė molinė koncentracija spindulio kelyje per atmosferą užrašoma taip:

$$c = \frac{1}{h_A} \int_0^{l(h_A)} c(h) dl(h) = \frac{1}{h_A} \int_0^{h_A} c(h) \cdot \frac{\partial l(h)}{\partial h} dh = \frac{1}{h_A} \int_0^{h_A} c(h) \frac{R+h}{\sqrt{(R+h)^2 - (R+h_s)^2 \sin^2 \theta}} dh$$

$$c = \frac{1}{h_A} \int_{h_s}^{h_A} c(h) \frac{R+h}{\sqrt{(R+h)^2 - R^2 \sin^2 \theta}} dh \quad (1.60)$$

Čia: h_A – atmosferos auškštis, m;

Matematinis gautosios išraiškos integravimas įmanomas, tik jei $\theta = 0$, todėl šiam procesui reikalingas skaitinis integravimo metodas.

Šiame darbe taip pat analizuojama Marso atmosferinė ekstinkcija, todėl būtina žinoti jo atmosferos slėgio išraišką. Vienas iš fizikinių formulių privalumų yra tas, kad jos yra universalios, todėl (1.56) lygtis gali būti naudojama ir kitų Saulės sistemos kūnų atmosferos slėgiui apskaičiuoti. Be Žemės ir dujinių milžinių, atmosferą turi Venera, Marsas ir Saturno palydovas – Titanas. Nepaprastai plonas, tačiau vis vien atmosferas turi ir Žemės palydovas Mėnulis, Jupiterio palydovai:

Ganimedas, Europa ir Kalista, Saturno palydovai: Rėja, Dionė ir Enceladas bei Urano palydovė Titanija.

Už daugiau nei 54,6 milijonų kilometrų esančios raudonosios planetos atmosfera yra iširta ganėtinai plačiai. Marsas, kaip ir Žemė, turi troposferą, mezosferą, termosferą ir egzosferą, tačiau joje nėra stratosferos, nes ši planeta neturi ozono sluoksnio. Laisvojo kritimo pagreitis Marso paviršiuje lygus $3,711 \text{ m/s}^2$, molekulinė oro masė – $43,34 \text{ g/mol}$, o globalūs metiniai paviršiaus temperatūros ir slėgio vidurkiai atitinkamai lygūs 215 K ir 610 Pa . Lyginant su Žeme, Marso troposfera yra stora ir apytiksliai lygi 60 km . Joje temperatūra krenta vidutiniškai $2,5^\circ\text{C}$ vienam kilometrui. Marso mezosferoje temperatūra beveik nekinta, o ši tęsiasi iki maždaug 100 km virš planetos paviršiaus. Temperatūros matavimai Žemėje paprastai vykdomi specialiais oro balionais, tačiau Marse jie gauti zondų „Viking 1“, „Viking 2“ ir „Pathfinder“ nusileidimų metu [36]. Įdomu tai, kad kol kas Marso paviršiuje funkcionuojančius savaeigius ar stacionarius įrenginius turi tik Nacionalinė Aeronautikos ir Kosmoso Administracija – NASA. Kitų organizacijų bandymai sėkmingai nutupdyti funkcionuojantį prietaisą ant raudonosios planetos paviršiaus baigdavosi jo praskriejimu pro šalį arba padidintu planetos paviršiaus kraterių skaičiumi.

Žinant pagrindinius Marso atmosferos parametrus, išvardintus anksčiau, bei remiantis (1.55) ir (1.56) formulėmis, užrašoma jo atmosferos temperatūros ir slėgio priklausomybė nuo geopotencialinės altitudės. Pastebėtina, kad gautose (1.61) ir (1.62) lygtyse indeksas $[M]$ nurodo ne laipsnio rodiklį, o tai, kad parametras taikomas išskirtinai Marsui.

$$T^{[M]} = 215 - 0,0025z^{[M]}, \quad \text{kai } z^{[M]} \in [0; 60\,000] \text{ m} \quad (1.61)$$

$$P^{[M]} = \begin{cases} 610 \left(1 - \frac{1}{86\,000}z^{[M]}\right)^{7,738}, & \text{kai } z^{[M]} \leq 60\,000 \text{ m} \\ 0,05824e^{-\frac{2,976}{10\,000}(z^{[M]}-60\,000)}, & \text{kai } z^{[M]} > 60\,000 \text{ m} \end{cases} \quad (1.62)$$

Čia: $T^{[M]}$ – Marso atmosferos absoliučioji temperatūra, K;

$P^{[M]}$ – Marso atmosferos slėgis, Pa;

$z^{[M]}$ – geopotencialinė altitudė Marse, m;

Geopotencialinė altitudė Marse apskaičiuojama pagal išraišką (1.63).

$$z^{[M]} = \frac{R_{M_p} h}{R_{M_p} + h} \quad (1.63)$$

Čia: R_{M_p} – Marso spindulys polių (ašigalių) kryptimi. $R_{M_p} = 3\,376\,200$ m [11].

Marso atmosferą sudaro 95,97% anglies dioksido, 1,93% argono, 1,89% azoto, likusi dalis priklauso deguoniui, anglies monoksidui ir kitoms dujoms. Minėtųjų dujų procentinis santykis yra pastovus visoje planetoje nepriklausomai nuo geografinės padėties ar altitudės [37].

Taigi (1.60) formulė gali būti perrašyta taip:

$$c = \frac{1}{h_A} \int_{h_s}^{h_A} c(h) \frac{R+h}{\sqrt{(R+h)^2 - R^2 \sin^2 \theta}} dh = \frac{1}{M h_A} \int_{h_s}^{h_A} \rho(h) \frac{R+h}{\sqrt{(R+h)^2 - R^2 \sin^2 \theta}} dh$$

$$c = \frac{1}{M h_A} \zeta \quad (1.64)$$

Čia: ζ – absoliučioji oro masė, apskaičiuojama (1.65) lygtimi [27].

$$\zeta = \int_{h_s}^{h_A} \rho(h) \frac{R+h}{\sqrt{(R+h)^2 - R^2 \sin^2 \theta}} dh = \frac{M}{R \cdot T_0} \int_{h_s}^{h_A} P(h) \frac{R+h}{\sqrt{(R+h)^2 - R^2 \sin^2 \theta}} dh \quad (1.65)$$

Čia: T_0 – absoliučioji temperatūra nulinės atskaitos lygyje.

Absoliučioji oro masė ζ ir santykinė oro masė \mathcal{M} yra susijusios išraiška (1.66), tačiau santykinės oro masės, skaičiuotos 1.2.2. punkte, lygtis yra skirtinga, kadangi pastaroji pritaikyta tik nekintančio tankio atmosferai.

$$\mathcal{M} = \frac{\zeta}{\zeta_{zen}} \quad (1.66)$$

Čia: ζ_{zen} – absoliučioji oro masė zenito kryptimi ($\theta = 0^\circ$), apskaičiuojama remiantis (1.67) lygtimi.

$$\zeta_{zen} = \frac{M}{R \cdot T_0} \int_{h_s}^{h_A} P(h) dh \quad (1.67)$$

Absoliučioji oro masė zenito kryptimi dar vadinama oro stulpelio tankiu ir priklauso nuo stebėtojo altitudės.

Taigi, žinant santykinės oro masės dydį, kuris priklauso nuo zenitinio kampo θ , atmosferos parametrus bei molinį ekstinkcijos koeficientą, randamą fotometrijos duomenų bazėse, galima apskaičiuoti atmosferos optinį pralaidumą.

1.3. Fotovoltiniai elementai

Fotovoltinis elementas, dar vadinamas saulės elementu, yra elektros prietaisas, šviesos energiją tiesiogiai verčiantis elektros energija. Vienos energijos rūšies keitimo kita procesas vyksta dėl fotovoltinio efekto [38]. Fotovoltiniu efektu vadinamas įtampos bei elektros srovės susikūrimas medžiagoje ją paveikus šviesa. Tai yra tiek fizikinis, tiek cheminis reiškinys, tačiau jis dažnai maišomas su fotoelektriniu efektu. Abiem atvejais šviesa yra sugerama, taip sužadinant krūvininką, paprastai elektroną, pereiti į aukštesnės energijos būseną, tačiau fotovoltinis efektas pasižymi tuo, kad krūvininkas yra išstumiamas iš medžiagos, o fotoelektrinio efekto atveju krūvininkas lieka joje [39]. Abiem atvejais įtampa – elektrinis potencialas – yra sukuriamas atskiriant krūvius, todėl šviesa turi turėti pakankamai energijos įveikti krūvininkų sužadinimo potencialinį barjerą arba elektronų draustinę energijos juostą (angl. *bandgap*, toliau – draustinę juostą). Fizikine prasme skirtumas yra tas, kad fotoelektrinė emisija krūvius atskiria balistine kondukcija, o fotovoltinė emisija – difuzijos būdu [39].

1.3.1. Sistemų struktūra

Fotovoltinis elementas yra priskiriamas fotoelementų grupei. Pastarieji apibrėžiami kaip įrenginiai, kurių elektrinės charakteristikos, pavyzdžiui, srovė, įtampa arba varža, pakinta, juos paveikus saulės šviesa. Saulės elementas yra apibūdinamas kaip fotovoltinis elementas, nesvarbu ar spindulių šaltinis yra Saulė, ar dirbtinė šviesa. Keletas saulės elementų, integruotų vienoje grupėje ir orientuotų vienoje plokštumoje, sudaro saulės fotovoltinį modulį (toliau – saulės modulį). Du ar daugiau tarpusavyje elektriškai sujungtų saulės modulių sudaro saulės modulių masyvą, o vienas ar keletas saulės modulių masyvų kartu su konstrukciniais, valdymo, energijos saugojimo, matavimo ir perdavimo elementais sudaro fotovoltinę sistemą [38].

1.3.2. Sandara ir veikimo principas

Fotovoltinis elementas yra gaminamas iš specialios klasės medžiagų, vadinamų puslaidininkiais. Puslaidininkiais vadinamos medžiagos, kurios pagal savo elektrinį laidumą užima

tarpinę padėtį tarp laidininkų ir dielektrikų [41]. Iš visų puslaidininkinių medžiagų silicis yra naudojamas dažniausiai. Jis yra antras labiausiai paplitęs cheminis elementas Žemėje, o jo cheminės savybės yra tinkamos fotovoltinių elementų gamybai [40]. Vis dėlto dėl aukštesnio naudingumo ir atsparumo kosminei spinduliuotei, kosminėje pramonėje labiau vertinami yra galio arsenido fotovoltiniai elementai.

Silicio atomas turi 14 elektronų, išsidėsčiusių trijuose energijos lygmenyse ($2s8p4d$). Pirmieji du lygmenys, išsidėstę arčiausiai centro, yra užpildyti visiškai, tačiau išorinis lygmuo su 4 iš 8 elektronais yra tik pusiau užpildytas [40]. Silicis turi 4 nesuporuotus elektronus, todėl sakoma, kad jis yra keturvalentis. Iš chemijos žinoma, kad medžiagos atomai visada stengiasi užpildyti savo išorinį sluoksnį, todėl silicis savo elektronus dalijasi kartu su kitais silicio atomais taip sudarydamas kovalentinius ryšius. Tokiu būdu suformuojama kristalinė struktūra su tam tikru atomų išsidėstymu, svarbiu fotovoltinio elemento funkcionavimui [40].

Siliciui suteikus energijos, kovalentiniai ryšiai tarp atomų gali suirti ir elektronai atsiskirti nuo savo atomų palikdami skylės – teigiamo krūvio krūvininkus [40]. Išlaisvintieji elektronai ir išlaisvintosios skylės dar vadinami laisvaisiais krūvininkais. Laisvieji elektronai veikiami išorinio elektrinio lauko juda kristale ir sukuria elektroninio laidumo srovę, kol galiausiai rekombinuoja (patenka į skylę) arba yra sunaudojami darbui atlikti [40, 41]. Išlaisvintųjų elektronų negali pagauti kaimyniniai silicio atomai, nes jų valentinės jungtys yra prisotintos [41]. Grynajame silicyje yra nedaug laisvųjų elektronų, todėl visas procesas nėra pakankamai našus energijos gamybai, tačiau jį legiruojant kitos medžiagos atomais, galima padidinti silicio elektronų pernešimo gebą – laidumą [40].

Puslaidininkių laidumas labai priklauso nuo menkiausių priemaišų kiekio juose. Esminė puslaidininkių ypatybė yra ta, kad dėl juose esančių priemaišų šalia savojo laidumo atsiranda papildomas – priemaišinis laidumas. Keičiant priemaišų koncentraciją, taip pat keičiama vieno ar kito ženklo krūvininkų skaičius. Dėl šio priežasties galima pagaminti puslaidininkius su vyraujančia neigiamų arba teigiamų krūvininkų koncentracija. Priemaišos yra skirstomos į donorines ir akceptorines. Lengvai atiduodančios elektronus ir taip padidindamos laisvųjų elektronų skaičių, vadinamos donorinėmis, o priemaišos, padedančios kurti teigiamus laisvuosius krūvininkus, vadinamos akceptorinėmis [41].

Silicis, silpnai legiruotas fosforu (vienas fosforo atomas milijonui silicio atomų), vis vien sudarys kovalentinius ryšius su kaimyniniais silicio atomais, tačiau fosforas, turėdamas penkis elektronus išoriniame sluoksnyje, turi vieną, negalintį sudaryti cheminio ryšio su aplinkiniais, todėl šiam elektronui išjudinti reikalinga energija yra mažesnė. Dėl šios priežasties nesuporuotieji fosforo elektronai išsilaisvina padidindami laisvųjų krūvininkų skaičių kristale. Fosforu legiruotas silicis yra neigiamo tipo – n-tipo – kadangi jame yra daugiau neigiamų nei teigiamų laisvųjų krūvininkų [40].

Vis dėlto tik viena fotovoltinio elemento dalis gali būti n-tipo, likusi dažniausiai legiruojama boru, savo išoriniame sluoksnyje turinčiu tik tris elektronus, ir sakoma esanti teigiamo tipo – p-tipo. p-tipo puslaidininkinė medžiaga laikoma turinti ne laisvuosius elektronus, o laisvąsias skylės. Silicio-boro mišinyje jų yra 3 [40]. Nutrūkus kovalentinei jungčiai, atsiranda laisva vieta, kurią gali užimti vienas kaimyninio atomo elektronas, o jo vietą – kito atomo elektronas ir t.t. Vietos, kurioje trūksta elektrono, netvarkingas judėjimas suprantamas kaip teigiamojo elektros krūvio judėjimas. Skylės padėtis nėra nekintama – nenutrūkstamai vyksta toks procesas: vienas elektronas peršoka į kito atomo skylę ir ten sudaro užtikrinančią atomo jungtį. Toje vietoje, iš kurios peršoko elektronas, atsiranda nauja skylė ir procesas kartojasi. Taigi skylė gali judėti visu kristalu, tačiau kol nėra išorinio lauko, jos judėjimas yra chaotiškas. Kristalui atsідūrus elektriniame lauke, skylės ima judėti kryptingai – atsiranda skylinio laidumo srovė [41].

Sulietus n-tipo ir p-tipo silicį elektronai ir skylės ima maišytis medžiagų lietimosi taške. Tokiu atveju silicis yra natūraliai sutrikdomas, o laisvieji elektronai kaupiasi sudarydami barjerą, dėl kurio elektronams iš n-sluoksnio yra sunkiau peršokti į p-sluoksnį. Galiausiai pasiekama pusiausvyra, o elektrinis laukas medžiagoje yra perskiriamas į dvi dalis. Elektrinis laukas ne tik įgalina, tačiau ir padeda elektronams iš p-sluoksnio tekėti į n-sluoksnį, bet ne atvirkščiai. Kai fotonas pataiko į n-sluoksnį, jis, turėdamas pakankamai energijos, iš kovalentinio ryšio gali išmušti elektroną, o tokie elektronai pasilieka tame pačiame n-sluoksnyje. Jei pakankamai energijos turintis fotonas pataiko į p-sluoksnį, jis iš kovalentinio ryšio gali išmušti elektroną, o šis gali netrukdomai keliauti į n-sluoksnį. To rezultatas – elektronų perteklius neigiamoje pusėje. Fotovoltinio elemento sluoksnius sujungus laidininku sudaroma grandinė elektronams tekėti iš n-tipo į p-tipo pusę. Tokiu būdu gaunama nuolatine elektros srovė [40].

Didžiausioji dalis saulės elementų gali būti skirstomi į dvi grupes: kristalinius ir plonasluoksnius. Kristaliniai silicio moduliai dar skirstomi į monokristalinius ir polikristalinius. Plonasluoksniai saulės elementai gaminami iš amorfinio silicio ar kitos rūšies puslaidininkių, pavyzdžiui: kadmio telūro (CdTe) ar vario indžio-galio (di)selenido (CIGS). Labiausiai dominantys mokslininkus yra plonasluoksniai saulės elementai, tačiau kristaliniai elementai užima daugiau nei 80% rinkos [42].

Lyginant kristalinio silicio ir galio arsenido saulės elementus, pirmenybė teikiama pastariesiems, kadangi jie pasižymi didesniu efektyvumu, o ir veikiami kosminės radiacijos degradoja lėčiau. Šiuo metu patys ekonomiškiausi gamyboje esantys saulės elementai yra tandeminiai (angl. *multi-junction*). Tandeminiai saulės elementai yra sudaryti iš keleto p-n sandūrų bei skirtingų puslaidininkinių medžiagų, tokių kaip galio arsenido (GaAs), indžio galio fosfido (InGaP) ar germanio (Ge), sluoksnių. Didesnis sluoksnių skaičius fotovoltiniams elementams leidžia sugerti daugiau energijos iš saulės šviesos [43, 44]. Begalinio p-n sandūrų kiekio fotovoltiniai

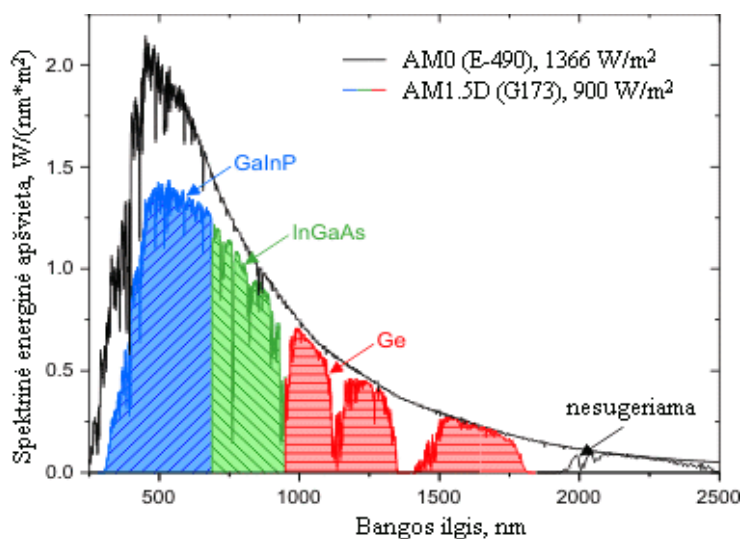
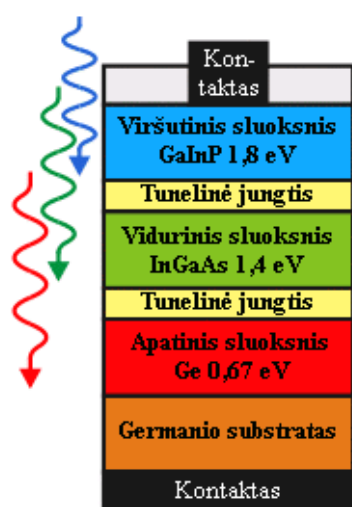
elementai teoriškai elektros energija galėtų versti net 86.8% stipriai koncentruotos saulės šviesos [44]. Šiuo metu pačių ekonomiškiausių tandeminių saulės elementų efektyvumas siekia 38.8% esant nekoncentruotam AM1.5C apšvietimui ir 46% esant koncentruotam AM1.5C apšvietimui [43].

1.3.3. Tandeminiai fotovoltiniai elementai

Vienos p-n sandūros fotovoltinių elementų efektyvumo neįmanoma padidinti daugiau, nei Shockley-Queisser riba – 33,7%, kai draudžiamosios juostos plotis yra 1,1 eV. Fotonai, kurių energija yra mažesnė nei medžiagos draudžiamosios energijos juostos plotis, nėra absorbuojami, o fotonai, kurių energija yra didesnė – sukuria elektronus, turinčius perteklinę energiją, kuri yra perduodama gardelei ir kelia jos temperatūrą, o tai papildomai mažina efektyvumą [45].

1.15 pav. pavaizduota tandeminio fotovoltinio elemento struktūra ir atskirų sandūrų sugeriamas saulės šviesos spektras (b). Viršutinėje sandūroje, kuri pasižymi dideliu draustinės energijos juostos pločiu, absorbuojama tik trumpiausio bangos ilgio elektromagnetinė spinduliuotė, pernešanti didžiausią kiekį energijos. Likusi spinduliuotės dalis į viršutinį sluoksnį prasiskverbia kiaurai ir yra absorbuojama žemesniuose sluoksniuose [45].

Teorinė tandeminių fotovoltinių elementų, turinčių begalinį kiekį sandūrų, efektyvumo riba yra ~86%. Realybėje toks efektyvumas nepasiekiamas ir, tikėtina, pasiekiamas nebus dėl technologinių kliūčių. Norint pasiekti aukštą efektyvumą, kiekviena sandūra tekančios srovės stipris turi būti panašus į likusių sandūrų. Jei ši sąlyga netenkinama, krenta fotovoltinio elemento įtampa, o dėl to krenta efektyvumas. Bendroji nuosekliai sujungtų sandūrų įtampa yra lygi visose sandūrose generuojamų įtampų sumai, todėl, norint didinti tandeminių elementų efektyvumą, būtina optimizuoti per sandūras tekančias sroves [45].



1.15 pav. Tandeminio fotovoltinio elemento: (a) struktūra, (b) atskirų sluoksnių sugeriamas saulės šviesos spektras [61]

Paprasčiausias būdas gerinti tandeminių elementų efektyvumą yra didinti jų sandūrų skaičių. Tai atliekant praktikoje, susiduriama su daugybe sandūrų derinimo problemų, todėl jų skaičių verta didinti tik iki tam tikros ribos. Maksimalus teorinis efektyvumas yra 37%, 50%, 56% ir 72% esant atitinkamai 1, 2, 3 ir 36 sandūroms [45].

1.3.4. Pritaikymas kosminiuose zonuose

Saulės elementus išdėstant ant palydovo išorinių sienų, jo misijos laikas gali būti pratęstas be esminių pakeitimų konstrukcijoje ar energijos sistemose [39]. Dirbtinis Žemės palydovas „Vanguard 1“ buvo pirmasis kosminis aparatas, kuriame panaudotos saulės baterijos [43]. Į orbitą aplink Žemę jis buvo iškeltas 1958-ųjų kovą ir iki šiol karaliauja kaip seniausias, vis dar skriejantis dirbtinis palydovas, nors ryšys su juo nutrūko dar 1964-aisiais [46]. Trys prieš jį iškelti palydovai „Sputnik 1“, „Sputnik 2“, ir „Explorer 1“ energijos gamybos agregatų neturėjo, tačiau naudojo chemines baterijas, kurių energijos užteko atitinkamai 22, 6 ir 113 dienų [47, 48, 49]. Jau kitais metais – 1959-aisiais – JAV paleido palydovą, pavadinimu „Explorer 6“, turintį dideles sparno formos saulės elementų matricas, kas tapo bendru palydovų bruožu. Šios matricos buvo sudarytos iš 9 600 Hofmano saulės elementų [39].

Iki 1960-ųjų saulės elementai buvo (ir vis dar yra) pagrindinis energijos šaltinis visiems palydovams Žemės orbitoje ir didelei daliai zonduų Saulės sistemoje, nes jie pasižymi geriausiu galios ir svorio santykiu. Tokia saulės elementų sėkmė yra įmanoma tik todėl, kad kosminiuose zonuose elektros sistemos kaina yra labai didelė, o palydovų gamintojai turi tik keletą maitinimo šaltinių pasirinkimo galimybių ir yra pasirengę mokėti už geriausią įmanomą variantą. Kosmoso energijos sistemų rinka paskatino aukšto efektyvumo saulės elementų plėtrą. Nacionalinis mokslų fondas (angl. *National Science Foundation*, NSC), paskelbęs programą „Tyrimai nukreipti į nacionalinius poreikius“ (angl. *Research Applied to National Needs*), padėjo dar labiau plėtoti saulės elementų technologijas [39].

1990-ųjų pradžioje silicio pagrindu pagrįstos kosminiuose saulės elementuose naudojamos technologijos buvo pakeistos galio arsenido III-V kartos puslaidininkinėmis medžiagomis [39].

1.4. Radioizotopų energijos sistemos

Fotovoltiniai elementai yra puiki technologija elektros energijai gaminti, kai palydovai skrieja vidinės Saulės sistemos kūnų orbitose – vietose, kuriose yra pakankamai saulės šviesos ar aplinkos šilumos. Vis dėlto daugelis potencialių NASA misijų prioritetą skiria sudėtingomis aplinkos

sąlygomis pasižyminčioms vietovėms, o tokios misijos būtų neįmanomos arba labai ribotos be branduolinės energijos naudojimo [50].

NASA ir JAV Energetikos departamentas (angl. *Department of Energy*) stengiasi užtikrinti, kad ši gyvybiškai svarbi palydovų elektros energijos gamybos technologija būtų lengvai prieinama, taip sustiprinant ambicingas Saulės sistemos tyrinėjimų misijas šį dešimtmetį ir vėliau [51].

Pasirinkimas tarp fotovoltinės ir branduolinės energijos gamybos technologijų kosmoso misijoms visiškai priklauso nuo to, kur kosminis aparatas bus eksploatuojamas ir kokią misiją jis atliks, kai pasieks suplanuotą vietą. Radioizotopų⁸ energijos sistemos yra naudojamos tik tada, kai jos smarkiai pagerina misijos galimybę vykdyti suplanuotus mokslinius tyrinėjimus [50].

1.4.1. Pagrindinės savybės ir privalumai

Radioizotopų energijos sistemos (angl. *Radioisotope Power System*, toliau – RES) yra branduolinės energijos technologijų rūšis, kuri elektros energijos gamybai naudoja branduolinių skilimų metu išsiskiriančią energiją. RES generatoriais dažnai maitinamos kosminių zondų, nusileidimo ar savaeigių aparatų sistemos bei jų mokslinių tyrinėjimų įranga. Šiose sistemose dažniausiai naudojamas plutonis-238 [51].

Radioizotopų energijos sistemos pasižymi šiais privalumais: jos yra kompaktiškos, tvirtos ir tiekia patikimą energiją net ir atšiauriausioje aplinkoje, kur fotovoltiniai elementai yra nepraktiški. Pavyzdžiui, Saturnas yra maždaug dešimt kartų toliau nuo Saulės nei Žemė, o jį pasiekianti Saulės energinė apšvieta siekia tik vieną procentą to, ką galima išmatuoti Žemės atstumu. Nykštukinėje Plutono planetoje saulės elementais pavyktų išgauti 0,07% energijos, išgautinos Žemėje. Galimybė panaudoti radioizotopų skleidžiamą šilumą yra svarbi misijų į minėtąsias bei kitas neįtikėtinais tolimas vietas savybė, nes jose saulės baterijų, reikalingų tokiai pačiai energijai išgauti, dydis būtų nepraktiškai ar net neįsivaizduojamai didelis. Bene svarbiausias RES pranašumas – nepertraukiamas elektros energijos tiekimas ilgos trukmės kosmoso misijose, visiškai nepriklausant nuo saulės šviesos, temperatūros, radiacijos ar aplinkos sąlygų, pavyzdžiui, tirštų debesų bei dulkių. Be to, šilumos perteklius Radioizotopų energijos sistemose gali būti panaudojamas kosminio aparato instrumentų ir sistemų šildymui taip jiems suteikiant galimybę efektyviai veikti net ir labai šaltoje aplinkoje [50].

Ateityje radioizotopų energijos sistemos galėtų ir toliau užtikrinti misijas į kai kurias ekstremaliausiomis aplinkos sąlygomis pasižyminčias Saulės sistemos vietas, pavyzdžiui, Jupiterio mėnulio Europos vandenynus, skystuosius Saturno mėnulio Titano metano ežerus arba milžinės ledo planetos Urano žiedus ir natūraliuosius palydovus [50].

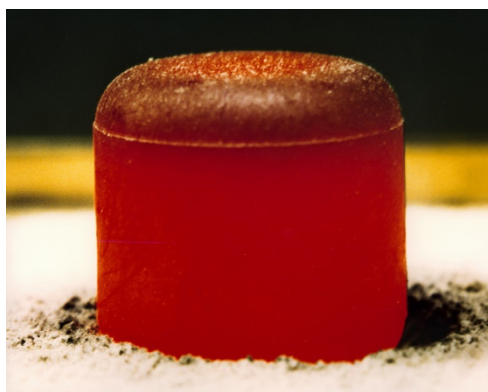
⁸ Radioizotopas – (radio- + gr. topas - vieta; sk. radijo/izotopas) – radioaktyvusis cheminio elemento izotopas

1.4.2. Rūšys

Radioizotopų energijos sistemos kosminiam zondui tiekia šilumą ir elektros energiją, taip suteikiant galimybę vykdyti mokslines misijas aplinkose, kur saulės šviesos energijos, cheminių baterijų ar kuro elementų pajėgumų nepakanka. RES yra priskiriamos „branduolinių baterijų“ grupei. Kai kurie kosminiai zondai, pavyzdžiui, Kasinis (angl. *Cassini*) savo sistemas maitina tiesiogiai iš branduolinių baterijų, kiti, pavyzdžiui, Mokslinė Marso laboratorija (angl. *Mars Science Laboratory*), labiau žinoma kaip marsaeigis „Smalsumas“ (angl. *Curiosity*), branduolines baterijas gali naudoti cheminėms baterijoms įkrauti ir savo sistemas bei mokslinio tyrinėjimo įrenginius maitinti pastarosiose sukauptą energiją [6].

Bendrosios paskirties šilumos modulis

Bendrosios paskirties šilumos modulis (angl. *General Purpose Heat Source Module*, toliau – BPŠM) yra esminis NASA naudojamo radioizotopų generatoriaus statybinis blokas. Toks modulis talpina ir saugo plutonį-238, kuris skleidžia šilumą skirtą elektros energijos gamybai arba aparato moduliams šildyti. Branduolinis kuras yra gaminamas taip, kad jo forma būtų panaši į granulę. Tokios Plutonio-238 dioksido ($^{238}_{94}\text{PuO}_2$) granulės (žr. 1.16 pav. (a)) apliejamos apsauginiu iridžio sluoksniu, suformuojant kuro granulę (žr. 1.16 pav. (b)).



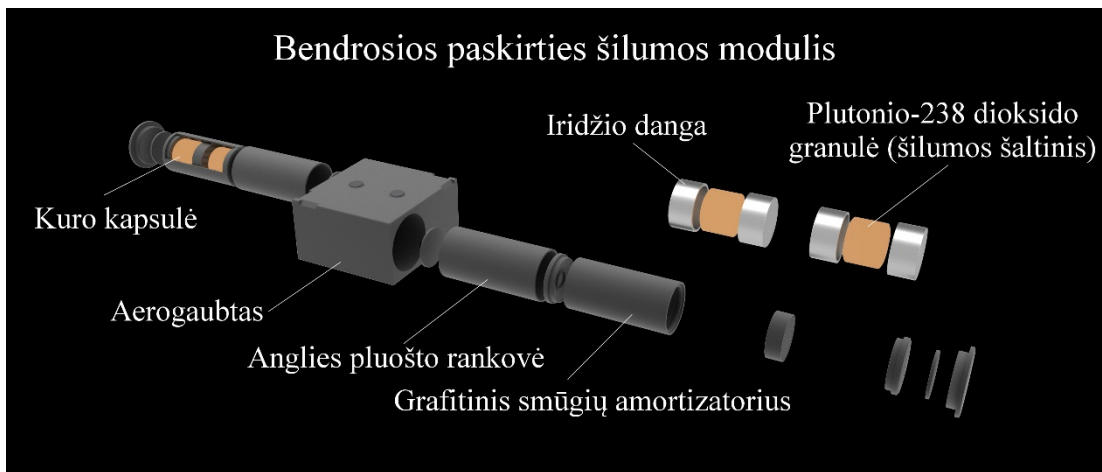
(a)



(b)

1.16 pav. Plutonio-238 dioksido granulė be iridžio apvalko (a) ir su juo (b) [55, 52]

Kuro granulės yra dedamos į apsauginį anglies pluošto apvalką ir kartu su aerogaubtu (angl. *aeroshell*) sudaro pilną BPŠM modulį (žr. 1.17 pav.)



1.17 pav. Bendrosios paskirties šilumos modulio sandara [52]

Kiekvieno BPŠM matmenys yra $93,2 \times 99,48 \times 58,2$ mm, svoris apytiksliai lygus 1,5 kg, o nominali šiluminė galia yra 250 W misijos pradžioje. Tokie moduliai gali būti naudojami atskirai arba sujungiami tarpusavyje.

Bendrosios paskirties šiluminiai moduliai sėkmingai išlaikė ekstremalių sąlygų bandymus, kurie gerokai viršijo platų galimų avarijų intensyvumą. Tokie bandymai imituoja keletą vieno modulio sugrįžimą į Žemės atmosferą, taip pat aukštos temperatūros raketinio kuro gaisro ar smūgio į kietą paviršių situacijas. Patobulinti BPŠM, naudojami naujausios kartos radioaktyviųjų izotopų energijos sistemose, yra gaminami iš padidinto atsparumo ir apsaugos medžiagų. Pavyzdžiui, į grafitinį aerogaubtą bei dviejų didžiausių modulio paviršių įdedama papildoma (20% storesnė) medžiaga. Šie pakeitimai suteikia didesnę apsaugą įvairiame avarinių sąlygų diapazone taip sumažinant potencialią plutonio-238 nuotėkio galimybę [52].

Radioizotopų termoelektrinis generatorius

Radioizotopų termoelektrinis generatorius (angl. *Radioisotope Thermoelectric Generator*, toliau – RTG) kosminiams zondams ir aparatams elektros energiją tiekia šilumą, gautą radioaktyvaus elemento skilimo metu, termoporomis keičiant elektra. Didelis pranašumas yra tai, kad RTG neturi jokių judančių dalių, kurios galėtų sugesti, užstrigti ar susidėvėti, todėl RES yra matoma kaip labai patikima elektros energijos teikimo technologija [52, 53].

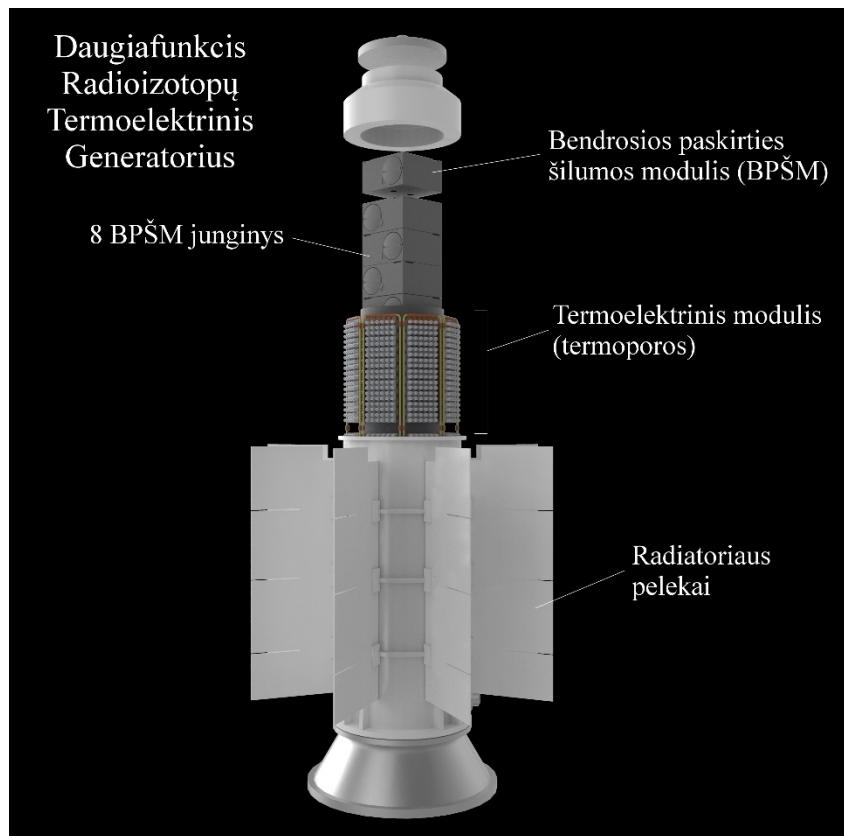
Termoporos dažnai sutinkamos kasdiniuose daiktuose, stebiniuose, registruojančiuose ar reguliuojančiuose savo temperatūrą, pavyzdžiui, oro kondicionieriuose, šaldytuvuose ar medicinos termometruose. Jos gaminamos iš dviejų skirtingų elektrai laidaus metalo plokštelių. Šias plokšteles sujungus (suvirinus ar sulydžius) jos sudaro uždara elektros grandinę, o jų galus paveikus skirtingomis temperatūromis, grandine ima tekėti elektros srovė. Radioizotopų termoelektriniame

generatoriuje, branduolinis kuras šildo tik vieną iš termoporos galų, tačiau kitas išlieka nešildomas, o dažnai net aušinamas kosmoso aplinkoje arba planetos atmosferoje [53].

Naujausia RTG technologija – daugiavfunkcis radioizotopų termoelektrinis generatorius – yra išvystyta ir jau naudojama marsaeigyje „Curiosity“, Marso planetoje nusileidusiame 2012 metų rugpjūtį [52].

Daugiavfunkcis radioizotopų termoelektrinis generatorius

Patikimų bei ilgalaikių energijos tiekimo sistemų poreikis yra svarbi ateities misijų vizija, vis labiau liečianti temas susijusias su Marso tyrinėjimais. NASA ir JAV Energetikos departamentas rengia naujos kartos ilgaamžių bei aukšto patikimumo branduolinių energijos sistemų technologiją įtraukti į platesnį svarbių mokslinių misijų repertuarą. Šie naujojo tipo RTG pavadinti daugiavfunkciais radioizotopų termoelektriniais generatoriais (angl. *Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator*, toliau – DRTG). Jie sukurti naudojimui tiek vakuume tiek planetose, turinčiose atmosferą. Šie naujosios kartos RTG turi lankstesnį modulinį dizainą, leidžiantį jų galią sudaryti žingsniais, siekiančiais šiek tiek daugiau nei 100 vatų. Pagrindiniai daugiavfunkcio radioizotopų termoelektrinio generatoriaus projektavimo tikslai yra aukštas saugumo lygis, galios lygių optimizavimas nemažesniame, kaip 14 metų periodui, bei mažesnis svoris [54]. DRTG projektuojamas taip, kad misijos pradžioje kurtų 125 W elektrinę galią, kuri dėl branduolių dalijimosi po 14 metų krenta iki 100 W. DRTG sveria 45 kilogramus, todėl savo misijos pradžioje jis pasižymi 2,8 W/kg galios-masės santykiu [55]. Daugiavfunkcio radioizotopų termoelektrinio generatoriaus išvaizda bei sandara pavaizduota 1.18 paveiksle.



1.18 pav. Daugiafunkcio radioizotopų termoelektrinio generatoriaus sandara [53]

2. TIRIAMOJI DALIS

2.1. Saulės šviesos energija kūnų paviršiuje ir jų orbitose

2.1.1. Nuotolio nuo Saulės įtaka kūnų pasiekiančiai Saulės energinei apšvietai

Naudojantis vertėmis iš 1.1 lentelės ir pirmajame skyriuje išvestomis (1.12), (1.13) bei (1.14) lygtimis, „MATLAB“ programavimo aplinkoje sudaroma funkcija $DtS(a,SSB)$ Saulės sistemos kūnų atstumo iki Saulės apskaičiavimui. Čia a yra orbitinis kampas α , o SSB – Saulės sistemos kūno raidinis atitikmuo. Kadangi kiekvieno kūno apskriejimo aplink Saulę periodas yra nevienodas, todėl skaičiavimuose patogiausia naudoti orbitinį kampą α , kurio vertė lygi 0, kai kūnas yra afelyje – tolimiausiame nuo Saulės taške. Programos kodas yra pateiktas 1-ame priede, o joje naudojamų Saulės sistemos kūnų raidiniai atitikmenys yra:

'Me' – Merkurijus;

'Ve' – Venera;

'Z' – Žemė;

'Ma' – Marsas;

'Vst' – Vesta;

'C' – Cerera;

'J' – Jupiteris;

'S' – Saturnas;

'U' – Uranas;

'N' – Neptūnas;

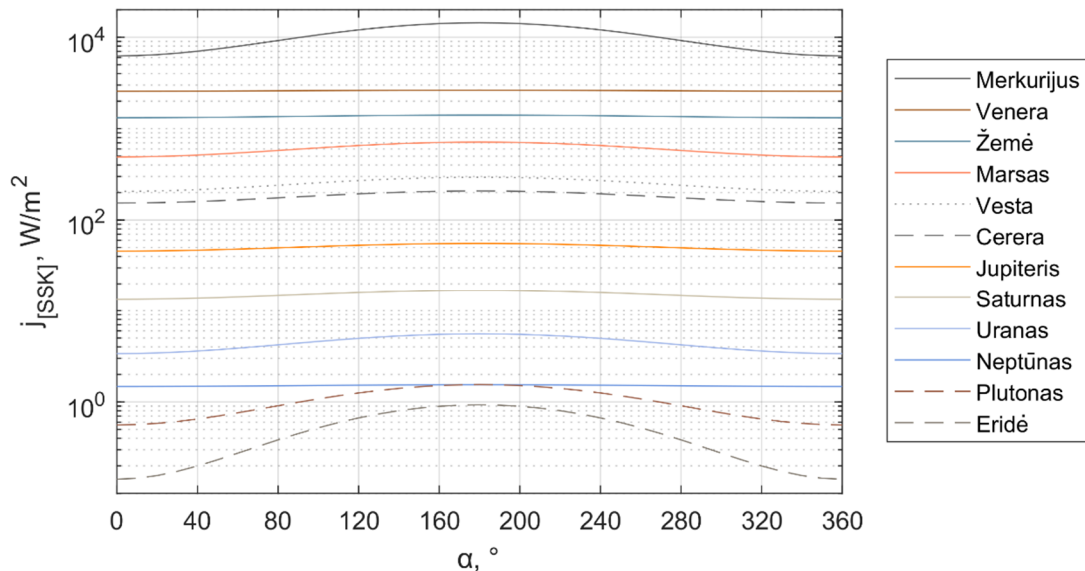
'P' – Plutonas;

'E' – Eridė.

Žinant atstumą tarp Saulės ir aplink ją orbita skriejančio kūno bei naudojantis (1.4) lygtimi, apskaičiuojama Saulės energinė apšvieta, pasiekianti šio kūno paviršiaus vienetą. Šiam tikslui „MATLAB“ programavimo aplinkoje sudaroma funkcija $SoIrr(l)$, kurioje kintamasis l reiškia kūno nuotolį iki Saulės centro. Programinis funkcijos kodas pateiktas žemiau.

```
function j = SoIrr(l)
% Rezultatai:    j - Saulės energinė apšvieta, W/m^2.
% Kintamieji:   l - atstumas iki Saulės, metrais;
% Programa:
Lsun = 3.828e+26;
j     = Lsun/(4*pi*(l^2));
end
```

Naudojantis sudarytomis funkcijomis nubrėžiamas 2.1 grafikas, kuriame pavaizduota kiekviena 1.1 lentelėje paminėtą Saulės sistemos kūną pasiekianti Saulės energinė apšvieta per vienerius siderinius metus⁹. 2.1 lentelėje tiems patiems objektams pateikiama skaitinė energinės apšvietos vertė, apskaičiuota mažiausiame, didžiausiame ir vidutiniame jų nuotolyje nuo Saulės. Palyginimui pateiktas šių dydžių santykis su vertėmis Žemės planetai.



2.1 pav. Saulės sistemos kūnų energinės apšvietos priklausomybė nuo jų orbitinio kampo α

2.1 lentelė. Saulės sistemos kūnų energinės apšvietos dydžiai pagal jų nuotolį nuo Saulės

Saulės sistemos kūnas	Perihelyje		Afelyje		Vidutiniame nuotolyje	
	$j_{[Pl]}, W/m^2$	$j_{[Pl]}/j_{[Ž]}$	$j_{[Pl]}, W/m^2$	$j_{[Pl]}/j_{[Ž]}$	$j_{[Pl]}, W/m^2$	$j_{[Pl]}/j_{[Ž]}$
Merkurijus	14 396	10,226	6 249,4	4,746 1	9 484,9	6,966 5
Venera	2 637	1,873 1	2 566,8	1,949 3	2 601,6	1,910 9
Žemė	1 407,8	1	1 316,8	1	1 361,5	1
Marsas	713,54	0,506 85	490,41	0,372 5	591,55	0,434 48
Vesta	294,18	0,208 97	205,81	0,156 3	246,06	0,180 73
Cerera	208,08	0,147 81	153,55	0,116 61	178,75	0,131 28
Jupiteris	55,546	0,039 46	45,745	0,034 74	50,408	0,037 02
Saturnas	16,650	0,011 83	13,281	0,010 09	14,87	0,010 92
Uranas	5,557 1	0,003 95	3,376 6	0,002 56	4,331 7	0,003 18
Neptūnas	1,542 1	0,001 10	1,474 2	0,001 12	1,507 8	0,001 11
Plutonas	1,547 5	0,001 10	0,559 93	0,000 43	0,930 84	0,000 68

⁹ Sideriniai metai (taip pat žvaigždiniai metai) yra laiko tarpas, per kurį dangaus kūnas (palydovas) apkeliauja pagrindinį dangaus kūną, pvz., Žemė apkeliauja ekliptiką aplink Saulę.

Saulės sistemos kūnas	Perihelyje		Afelyje		Vidutiniame nuotolyje	
	$j_{[Pl]}, W/m^2$	$j_{[Pl]}/j_{[Z]}$	$j_{[Pl]}, W/m^2$	$j_{[Pl]}/j_{[Z]}$	$j_{[Pl]}, W/m^2$	$j_{[Pl]}/j_{[Z]}$
Eridė	0,930 07	0,000 66	0,142 87	0,000 11	0,364 52	0,000 27

Iš grafiko matoma, kad kai kuriems Saulės sistemos kūnams energinės apšvietos vertė stipriai svyruoja. Tai atsitinka dėl orbitos elipsiškumo. Žemės orbita yra beveik apskritiminė, todėl grafike matoma $j_{[Z]}$ vertė yra tiesinė, tačiau pastebėtina, kad Plutono atveju didžiausia ir mažiausia reikšmės skiriasi apytiksliai 2,76 kartus.

Iš 2.1 lentelės matoma, kad vidutinės energinės apšvietos reikšmės ties Jupiteriu nukrenta iki $50 W/m^2$. Tai atitinka 3,7% to, ką galima išmatuoti Žemėje. Saturno orbitoje galima pasiekti maksimalius 16,65 vatus kvadratinam metrui, o tokio pat ploto Eridės paviršiuje nepavyktų išgauti nė 1 vato. Iš tikrųjų tik vienas žmonių sukurtas aparatas, naudojantis saulės šviesos energiją savo instrumentams maitinti, yra įžengęs į išorinę Saulės sistemą, tai – dirbtinis Jupiterio palydovas Junona (angl. *Juno*). Esant tokiam dideliame atstumui nuo Saulės, šio palydovo įspūdingo $72 m^2$ ploto fotovoltinių elementų masyvas generuoja tik 435 vatų galią, nors Žemės orbitoje pavyktų pasiekti 14 kW [56].

2.1.2. Saulės padėties dangaus skliaute priklausomybė nuo stebėtojo geografinės platumos

Remiantis 1.1.3. punkte išvestomis lygtimis bei 1.1 ir 1.2 lentelėse pateiktais Saulės sistemos kūnų duomenimis, apskaičiuojama, į kokį maksimalų aukštį h dangaus skliaute pakyla Saulė tam tikru siderinių metų laikotarpiu α , kai stebėtojas yra ant šio kūno paviršiaus ϕ geografinėje platumoje. Paminėtina, kad laikas skaičiuojamas orbitiniu kampu nuo $\alpha = 0$, kai kūnas yra afelyje, bet ne mėnesiais ar dienomis, kadangi orbitinį periodą skaičiuojant pastaraisiais dydžiais jis įvairiems kūnams yra skirtingas.

Remiantis (1.20) lygtimi zenitinis kampas θ pakeičiamas kampu h . Žinoma, kad $h = 90^\circ - \theta$, todėl pastarojo lygtis užrašoma taip:

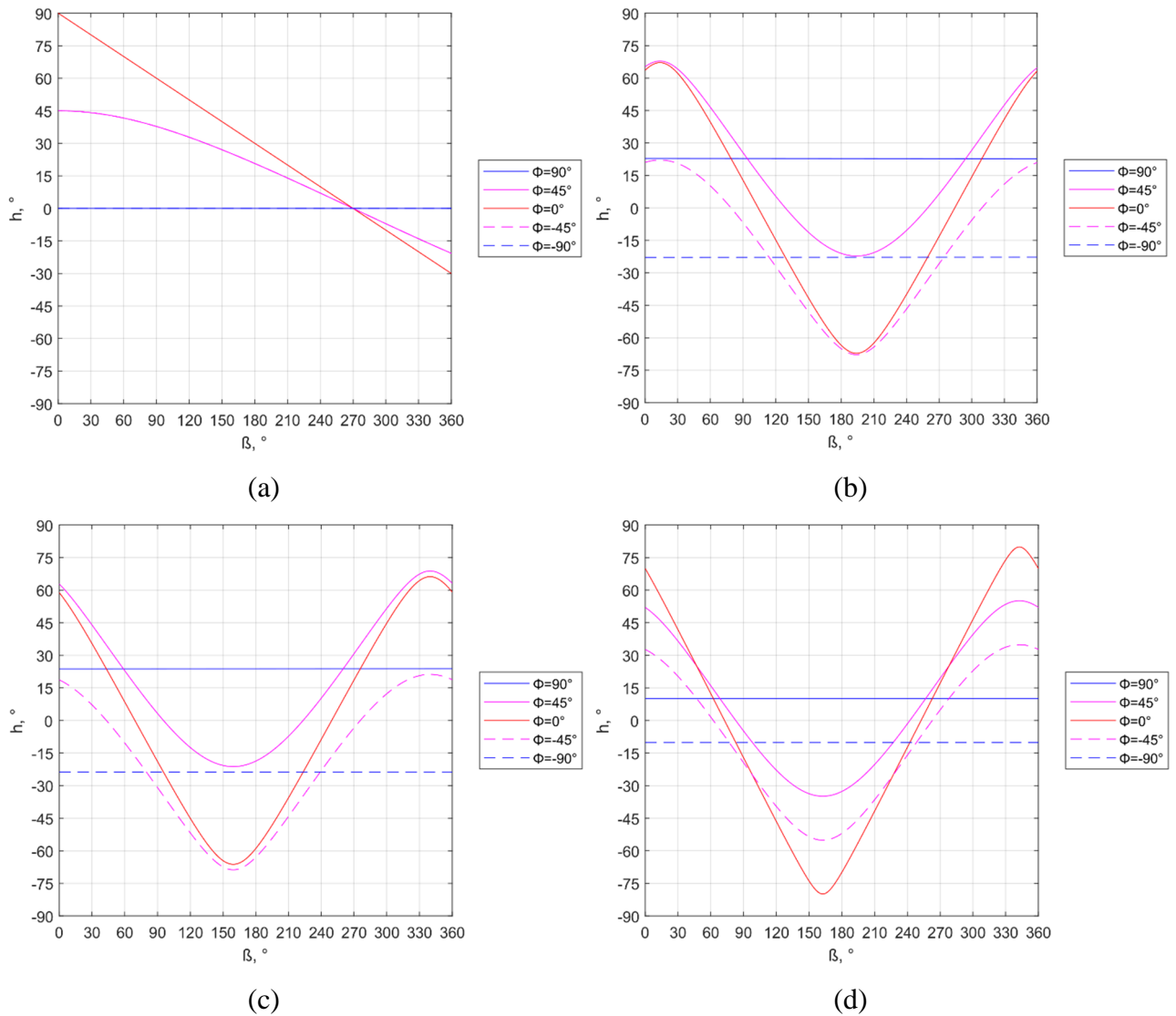
$$h = \sin^{-1} \left(\frac{l(\cos \phi \cos \epsilon \cos \beta \cos \check{\alpha} + \cos \phi \sin \beta \sin \check{\alpha} + \sin \phi \sin \epsilon \cos \check{\alpha}) - R}{\sqrt{R^2 - 2lR(\cos \phi \cos \epsilon \cos \beta \cos \check{\alpha} + \cos \phi \sin \beta \sin \check{\alpha} + \sin \phi \sin \epsilon \cos \check{\alpha}) + l^2}} \right) \quad (2.1)$$

Remiantis gautąja (2.1) bei turima (1.21) išraiška, kurioje $\check{\alpha} = \alpha + \alpha_0 + \beta/T_{dSi}$, „MATLAB“ programavimo aplinkoje sudaroma funkcija $SunEA(l, R, B, phi, eps, a, a0, TdSi)$ Saulės aukščio kampui apskaičiuoti. Čia l yra nuotolis nuo Saulės, apskaičiuojamas (1.12) lygtimi arba 2.1.1. punkte sudaryta $DtS()$ funkcija, R yra kūno, ant kurio yra stebėtojas, spindulys, B, phi, eps, a ir $a0$

atitinkamai yra parametrai $\beta, \phi, \epsilon, \alpha$ ir α_0 , o T_{dSi} kūno vieno orbitinio periodo (vienerių siderinių metų) trukmė siderinėmis dienomis. Tam tikriems Saulės sistemos kūnams R yra pateiktas 1.1 lentelėje, o ϵ, α_0 ir T_{dSi} – 1.2 lentelėje. Sudarytosios funkcijos programinis kodas pateiktas 2-ame priede.

Taikant sudarytąją $SunEA()$ funkciją, nubrėžiami Saulės kampo h grafikai (žr. 2.2 pav.) vienos Siderinės paros laikotarpiu penkiems skirtingiems taškams, išdėstytiems $\phi = \{90^\circ; 45^\circ; 0^\circ; -45^\circ; -90^\circ\}$ geografinėse platumose ant Merkurijaus, Žemės, Marso ir Cereros paviršių, kai pastarieji yra afelio taškuose ($\alpha = 0^\circ$).

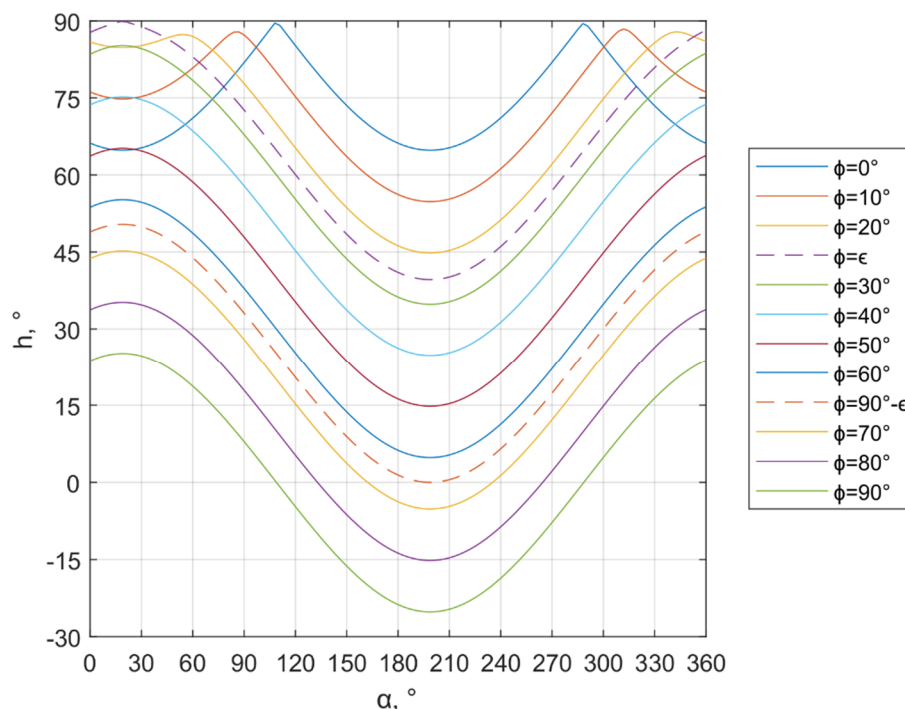
Iš grafiko matoma stebėtojo geografinės platumos (ϕ), sukimos ašies posvyrio kampo (ϵ) bei orbitinio kampo tarp saulėgrįžos ir afelio taškų (α_0) įtaka Saulės padėčiai dangaus skliaute. Stebint iš Saulės sistemos kūno šiaurės pusrutulio Saulė aukščiausiam taške danguje atsiduria tada, kai kūnas yra saulėgrįžos taške. Kadangi šiame darbe naujųjų metų pradžia laikomas kūno tranzitas per jo afelio tašką bei žinant, kad saulėgrįžos ir afelio taškai beveik niekada nesutampa, teigtina, kad siderinių metų pradžia nebūtinai prasideda vidurdienį ar vidurnaktį. Tai matoma 2.2 ir 2.4 paveiksluose. Kūnui esant afelyje, Saulės padėtis dangaus skliaute priklauso nuo kampo tarp saulėgrįžos ir afelio taškų – α_0 . 2.2 paveikslo (a) atveju $\alpha_0 = 0$, todėl Saulė naujųjų metų pradžioje yra aukščiausiam savo taške, (b) atveju $\alpha_0 > 0$, todėl stebėtojui reikia pasisukti kampu $\beta = \tilde{\alpha} \approx \alpha_0$, kad Saulė atsidurtų savo aukščiausiam taške, o (c) ir (d) atvejais $\alpha_0 < 0$, todėl stebėtojas šią poziciją yra pralenkęs $\beta = \tilde{\alpha} \approx \alpha_0$ kampu. Pastebėtina, kad esant $\alpha_0 \in (-180^\circ; 0^\circ)$ naujieji metai prasideda Saulei leidžiantis, o $\alpha_0 \in (0^\circ; 180^\circ)$ atveju – jai tekant.



2.2 pav. Saulės aukštis dangaus skliaute ant: (a) Merkurijaus, (b) Žemės, (c) Marso ir (d) Cereros paviršių, $\phi = \{90^\circ; 45^\circ; 0^\circ; -45^\circ; -90^\circ\}$ geografinėse platumose, kūnams esant afelio taške.

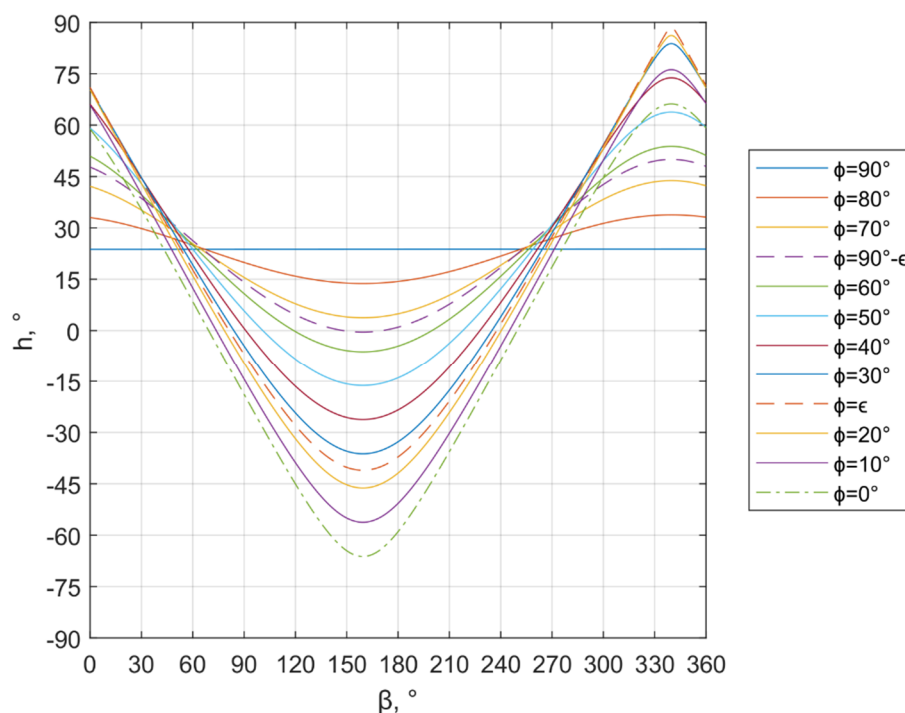
Merkurijaus planetai $\epsilon \approx 0$, todėl Saulės aukštis danguje tose pačiose geografinėse platumose yra vienodas abiejuose pusrutuliuose, be to, Saulė horizontą kerta tuo pačiu paros metu nepriklausomai nuo geografinės platumos, išskyrus $\phi = \pm 90^\circ$ atvejį (Saulė horizonto kryptimi matoma nuolat). Paminėtina, kad 2.2 paveiksle (a) atveju ištisinė linija uždengia punktyrinę, todėl pastaroji nėra matoma. Likusiems analizuojamiems kūnams $\epsilon \neq 0$, todėl 2.2 paveikslo (b), (c) ir (d) atvejuose matomas skirtumas tarp ištisinės ir punktyrinės linijos, kurios atitinkamai nurodo šiaurės ir pietų pusrutulius. Remiantis 2.3 paveikslu, kuris iliustruoja maksimalaus Saulės aukščio Marse priklausomybę nuo orbitinio kampo α bei 2.2 paveikslo (b), (c) ir (d) dalimis, matytina, kad kūniui, kurio sukimosi ašis yra pasvirusi į orbitos plokštumą, Saulės aukščio kampas priklauso ne tik nuo geografinės platumos, tačiau ir nuo kūno padėties orbitoje. Kai $\phi < \epsilon$, Saulė per vienerius metus į aukščiausiąją poziciją pakyla du kartus (lygiadienių taškuose), todėl matomos dvi kulminacijos. $\phi =$

ϵ atveju Saulė į savo aukščiausiąjį tašką pakyla vieną kartą per metus (saulėgrįžos taške). $\phi > \epsilon$ atvejis yra panašus į $\phi = \epsilon$, tačiau čia jos maksimalus aukštis žemėja, didėjant ϕ . Pastebėtina, kad peržengus ribą $\phi = 90^\circ - \epsilon$ atsiranda laiko tarpas, kurio metu Saulė virš horizonto nepakyla. Žemės planetoje toks reiškinys vadinamas poliarine naktimi.



2.3 pav. Maksimalus Saulės aukštis Marso planetos dangaus skliaute tam tikrose geografinėse šiaurės pusrutulio platumose vienerių siderinių metų laikotarpiu

2.4 paveiksle pavaizduota Saulės trajektorijos priklausomybė nuo kūno rotacinio kampo β , šiam esant afelio taške. Iš grafiko matytina, kad Saulė dienos metu aukščiausiai danguje atsiduria tada, kai stebėtojas yra $\phi = \epsilon$, ir žemiausiai, kai stebėtojas yra $\phi = 90^\circ$ geografinėje platumoje, nors pastaruoju atveju ji žemiau horizonto apskritai nenusileidžia. Pirmasis teiginys taip pat matytinas ir 2.3 paveiksle, kai $\alpha = 0$. Kitose geografinėse platumose Saulės aukščio kampas yra mažesnis. 2.4 paveiksle taip pat matytina tai, kad didėjant ϕ Saulė pateka anksčiau ir leidžiasi vėliau, o geografinėse platumose $\phi \geq 90^\circ - \epsilon$, Saulė žemiau horizonto nenusileidžia (poliarinė diena).



2.4 pav. Saulės trajektorijos Marso planetos, esančios afelio taške, dangaus skliaute priklausomybė nuo rotacinio kampo β tam tikrose geografinėse šiaurės pusrutulio platumose

2.1.3. Stebėtoją pasiekiantis Saulės šviesos energijos kiekis

2.1.1 punkte yra analizuojama Saulės sistemos kūno paviršių pasiekiančios momentinės saulės šviesos galios ploto vienetui – energinės apšvietos – priklausomybė nuo šio kūno orbitinės padėties. Norint apskaičiuoti apytikslį į vieną kvadratinį metrą kūno paviršiaus krentančios energijos kiekį, energinės apšvietos vertę reikia padauginti iš laiko tarpo. Dominantis laiko tarpas dažniausiai yra viena para, tačiau efektyvusis laiko tarpas, kada energijos iš saulės šviesos gamyba galima, yra tarp saulėtekio (aušros) ir saulėlydžio taškų. Šiame punkte yra analizuojamas kūną pasiekiantis saulės šviesos energijos kiekis vienos paros laikotarpiu.

Kaip paminėta praėjusiam paragrafe, apytikslis saulės šviesos energijos kiekis gali būti apskaičiuojamas energinės apšvietos vertę dauginant iš laiko tarpo. Toks skaičiavimo metodas pateiks tikslų rezultatą, jei kūnas aplink Saulę skrieja apskritime orbita, tačiau elipsinės orbitos atveju jis yra tik apytikris. Analizuojant vieną Merkurijaus planetos, kurios orbita yra stipriai elipsiška, o paros trukmė didelė, parą, tokiu metodu gaunami dideli netikslumai, todėl energinės apšvietos dydį yra būtina integruoti tarp aušros ir saulėlydžio taškų. Kadangi pagal 1.4 formulę j priklauso nuo atstumo iki Saulės, o šis nuo orbitinio kampo α , todėl gautoji energijos reikšmė yra išreiškiama ne per laiko, bet per kampo vienetą. Norint gautąją vertę paversti verte, išreiškiama standartiniais matavimo vienetais, ją reikia padauginti iš santykio $d_{Si}(\beta_s - \beta_a)/(2\pi(\tilde{\alpha}_2 - \tilde{\alpha}_1))$, kur d_{Si} yra vienos siderinės

paros trukmė valandomis, o β_s ir β_a yra atitinkamai rotaciniai saulėlydžio ir saulėtekio (aušros) kampai. Orbitiniai saulėlydžio ir saulėtekio kampai $\tilde{\alpha}_2$ ir $\tilde{\alpha}_1$ apskaičiuojami remiantis (2.2) lygtimi.

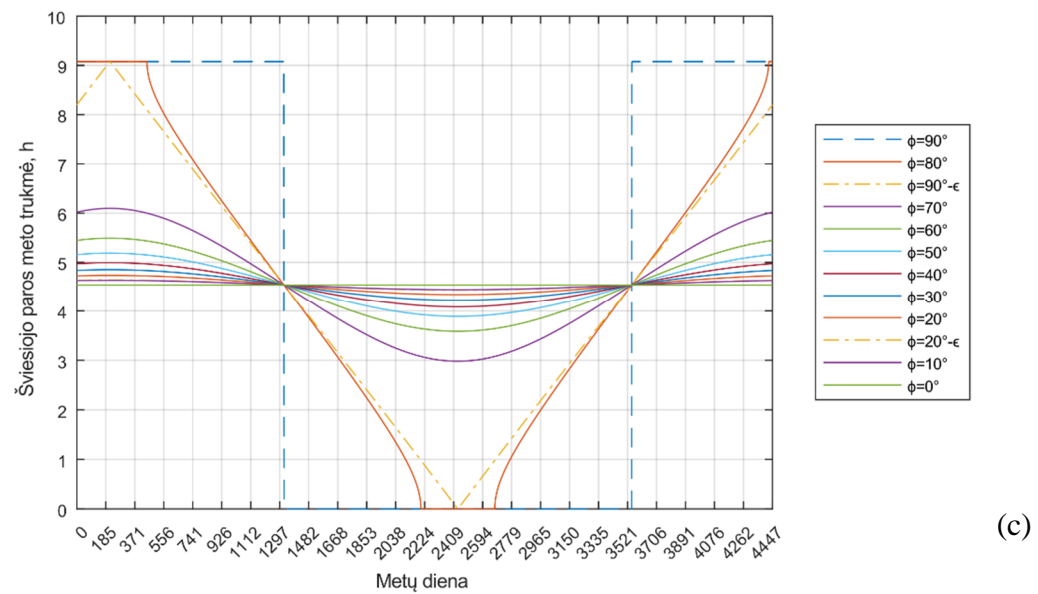
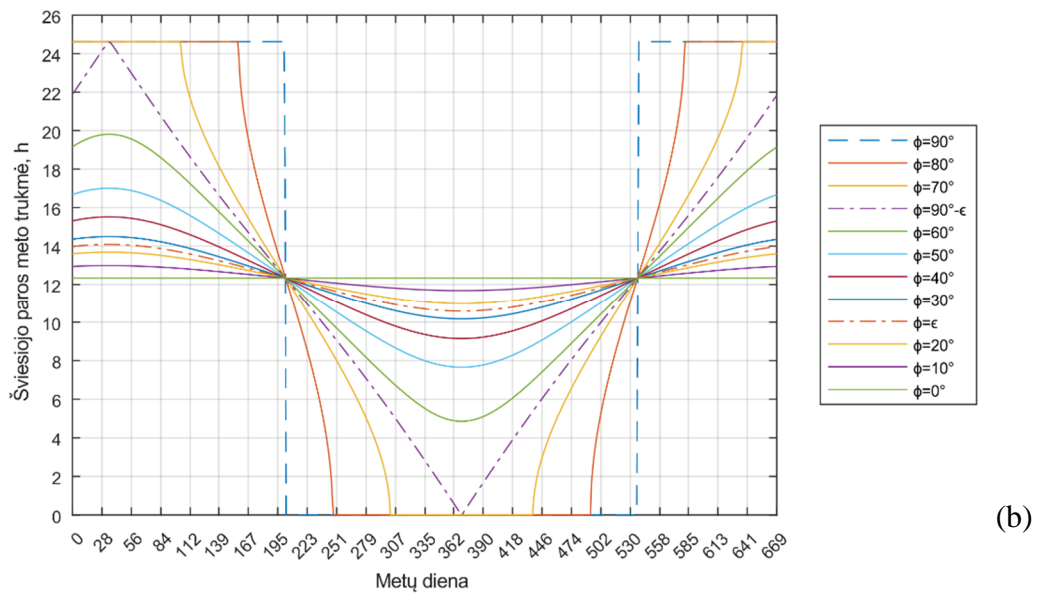
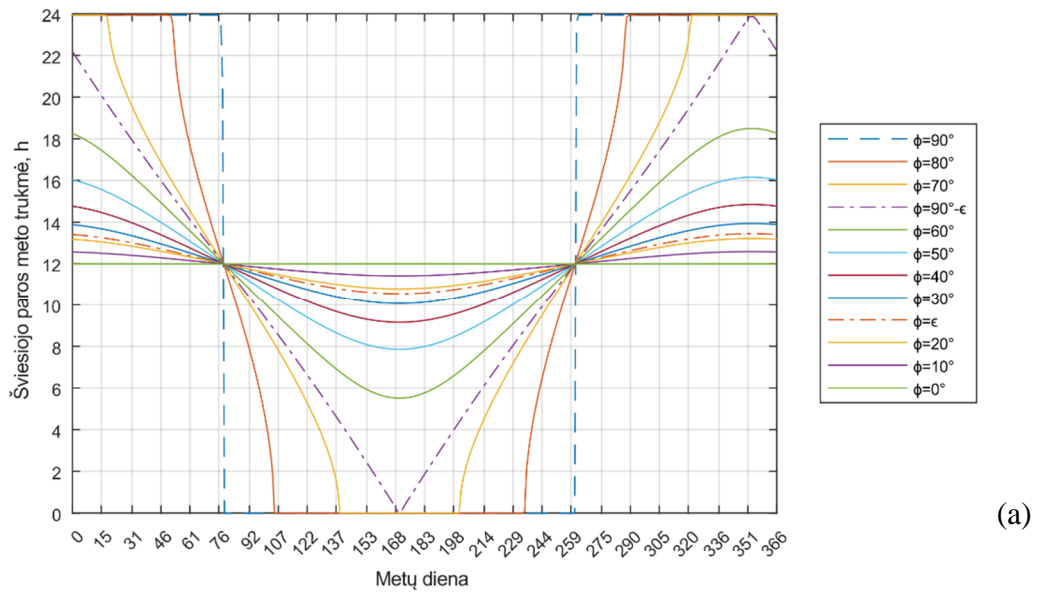
$$\tilde{\alpha} = \alpha + \frac{\beta}{T_{d_{Si}}} \quad (2.2)$$

Čia: $\tilde{\alpha}$ – kūno orbitinis kampas, atsižvelgiantis į jo rotacinį kampą β , rad;
 α – kūno orbitinis kampas, rad;
 β – kūno rotacinis kampas, išreiškiantis siderinės paros metą, rad;
 $T_{d_{Si}}$ – vienerių metų trukmė siderinėmis paromis.

2.1 lygtį prilyginus 0 surandama, koku metu (rotaciniu kampu β) Saulė kerta horizontą. Parametrą $\tilde{\alpha}$ laikant pastoviu dydžiu, ši lygtis gali būti išspręsta pritaikant matematinę formulę. Vis dėlto $\tilde{\alpha}$ nėra pastovus dydis, o analizę vykdant Merkurijaus planetai jis turi didelę įtaką. Pagal (1.21) formulę $\tilde{\alpha} = \alpha + \alpha_0 + \beta/T_{d_{Si}}$, tačiau tokiu atveju bendrojo β sprendinio išraiškos negali surasti net galingos matematinio modeliavimo platformos, todėl jis randamas skaitiniu metodu. Skaitinis metodas gali būti pritaikomas tiek GAMS, tiek MATLAB matematinio programavimo aplinkose, tačiau svarbu atkreipti dėmesį į tai, kad gautų reikšmių perkėlimas iš vienos aplinkos į kitą nėra paprastas procesas, ypač, kai sprendimo vykdymas yra automatizuotas. Dėl šios priežasties sprendinių radimas yra vykdomas MATLAB aplinkoje, kadangi joje yra užrašytos reikalingos funkcijos.

Nuliniams (2.1) lygties sprendiniams rasti MATLAB programavimo aplinkoje yra sudaroma funkcija $Findh0(phi, a, SSB)$, kurioje phi yra stebėtojo geografinė platumas ϕ , a yra kūno orbitinis kampas α , o SSB – Saulės sistemos kūno raidinis atitikmuo. SSB gali būti: 'Me' – Merkurijus, 'Z' – Žemė, 'Ma' – Marsas ir 'C' – Cerera, o bet kokia kita reikšmė grąžina nulinius rezultatus. Ši funkcija pateikia rotacinius kampus $\beta_{aušros}$ ir $\beta_{saulėlydžio}$ bei $\tilde{\alpha}_{aušros}$ ir $\tilde{\alpha}_{saulėlydžio}$ atsižvelgdama ir į tai, kad vienos siderinės paros metu Saulė horizontą gali kirsti tik vieną kartą (Merkurijaus planetoje) arba du kartus (likusiuose minėtuose kūnuose). Funkcijos programinis kodas pateiktas 3-iaame priede.

Taikant naujai sudarytą $Findh0()$ funkciją, nubrėžiamas 2.5 grafikas, iliustruojantis, kiek laiko per vieną dieną Saulė yra virš horizonto tam tikrose Žemės, Marso ir Cereros šiaurės pusrutulių geografinėse platumose per vienerius jų metus (vieną orbitinį periodą).



2.5 pav. Šviesiojo paros meto trukmė tam tikrose geografinėse šiaurės pusrutulio platumose: (a) Žemės planetoje, (b) Marso planetoje ir (c) Ceros nykštukinėje planetoje

Paminėtina, kad Merkurijaus planetai grafikas nebūtinai, kadangi jo sukimosi ašis nėra pakrypusi į orbitos ašį, todėl šviesusis paros metas bet kokiose platumose yra vienodas. Tai netaikoma tik ašigaliams, kuriuose Saulė horizonto kryptimi yra matoma nuolat. Šviesusis paros metas Merkurijuje lygus pusei jo paros, o ši, remiantis 1.2 lentelės duomenimis, yra lygi 4 222,5 valandoms.

2.5 grafike matoma, kad per vienerius metus egzistuoja du taškai, kuriuose visos kreivės susikerta, tai – lygiadienio taškai. Lygiadienio metu tamsiojo ir šviesiojo paros meto trukmės yra vienodos visose geografinėse platumose. Iš grafiko taip pat matytina, kad ties pusiauju dienos trukmė yra pastovi, o judant šiaurės kryptimi ilgiausios ir trumpiausios dienos trukmė ima skirtis. Pasiekus $\phi = 90^\circ - \epsilon$ geografinę platumą Saulė bent vieną parą per metus žemiau horizonto nenusileidžia. Tai įvyksta kūnui esant saulėgrįžos taške. Judant toliau į šiaurę, parų, kurių metu Saulė nenusileidžia žemiau horizonto, skaičius didėja. Išskirtiniu atveju, kai stebėtojas yra šiaurės ašigalyje ($\phi = 90^\circ$), egzistuoja tik poliarinė naktis ir poliarinė diena. Lyginant duomenis 2.5 grafiko (a), (b) ir (c) dalyse, pastebėtina, kad mažėjant kūno sukimosi ašies posvyriui, mažėja dienos trukmės skirtumai skirtingomis paromis, tačiau ekstremumai, tokie kaip $\phi = 90^\circ - \epsilon$ ir $\phi = 90^\circ$, išlieka.

Antrajame šio punkto paragrafe paminėta, kad 1.4 lygtis turi būti integruojama pagal orbitinį kampą α , tačiau jos kintamasis yra nuotolis nuo Saulės – l – apskaičiuojamas (1.12) lygtimi. l išraišką įstačius į (1.4) formulę, gaunama:

$$j_{[SSK]}(\alpha) = \frac{L_{\odot}(1 - \epsilon \cos \alpha)^2}{4\pi a^2(1 - \epsilon^2)^2} \quad (2.3)$$

Neapibrėžtinis gautosios lygties integralas yra:

$$J_{[SSK]}(\alpha) = \int j_{[SSK]}(\alpha) d\alpha$$

$$J_{[SSK]}(\alpha) = \frac{L_{\odot}}{4\pi a^2(1 - \epsilon^2)^2} \int (1 - 2\epsilon \cos \alpha + \epsilon^2 \cos^2 \alpha) d\alpha$$

$$J_{[SSK]}(\alpha) = \frac{L_{\odot}}{8\pi a^2(1 - \epsilon^2)^2} \left[\alpha(\epsilon^2 + 2) - 4\epsilon \sin \alpha + \frac{\epsilon^2}{2} \sin 2\alpha \right] \quad (2.4)$$

Čia: $J_{[SSK]}$ – į Saulės sistemos kūno paviršių krentantis saulės šviesos energijos tankis, $W \cdot \text{rad}/\text{m}^2$.

Paminėtina, kad išvestoje (2.4) lygtyje kampas α yra matuojamas ne laipsniais, o radianais. Į šią lygtį įstačius $Findh0()$ funkcija gautus $\tilde{\alpha}$ kampus, randamas Saulės šviesos energijos tankis. Kad skaičiavimus būtų galima vykdyti paprasčiau ir greičiau, MATLAB programinėje aplinkoje sudaroma funkcija $SEDens(a, SSB)$, kurioje kintamasis a yra orbitinis kampas α , o SSB – Saulės sistemos kūno raidinis atitikmuo: 'Me' – Merkurijus, 'Z' – Žemė, 'Ma' – Marsas ir 'C' – Cerera. Bet kokia kita SSB reikšmė grąžina nulinį rezultatą. Funkcijos programinis kodas pateiktas 4-ame priede.

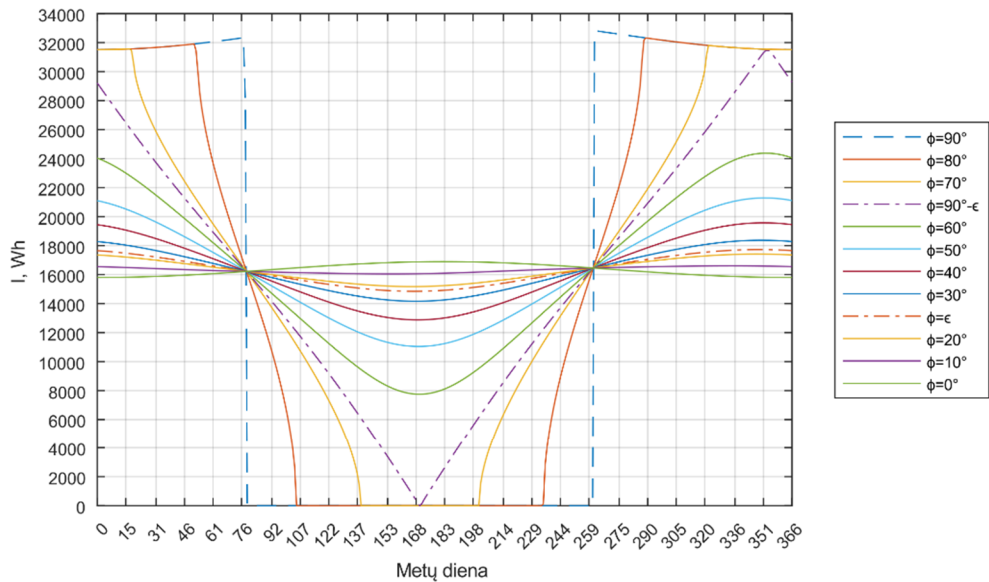
Naudojantis sudarytąja $SEDens()$ funkcija, nubrėžiamas 2.6 grafikas, iliustruojantis saulės šviesos energijos kiekį per vieną parą krentantį į 1 kvadratinį metrą Žemės, Marso ir Cereros paviršiaus plotą tam tikrose geografinėse šiaurės pusrutulio platumose.

2.6 grafikas remiasi rezultatais, naudotais brėžiant 2.5 grafiką, todėl matytina, kad jie abu yra panašūs. Vis dėlto 2.6 grafiko kreivės yra labiau išlinkusios, o tai atsitinka todėl, kad skirtingomis dienomis Saulės sistemos kūnas yra skirtingu atstumu nuo Saulės, o tai daro įtaką kūną pasiekiančiai energinei apšvietai. Kuo kūno orbita yra elipsiškesnė, tuo energijos, pasiekiančios kūno paviršių, dydis svyruoja labiau.

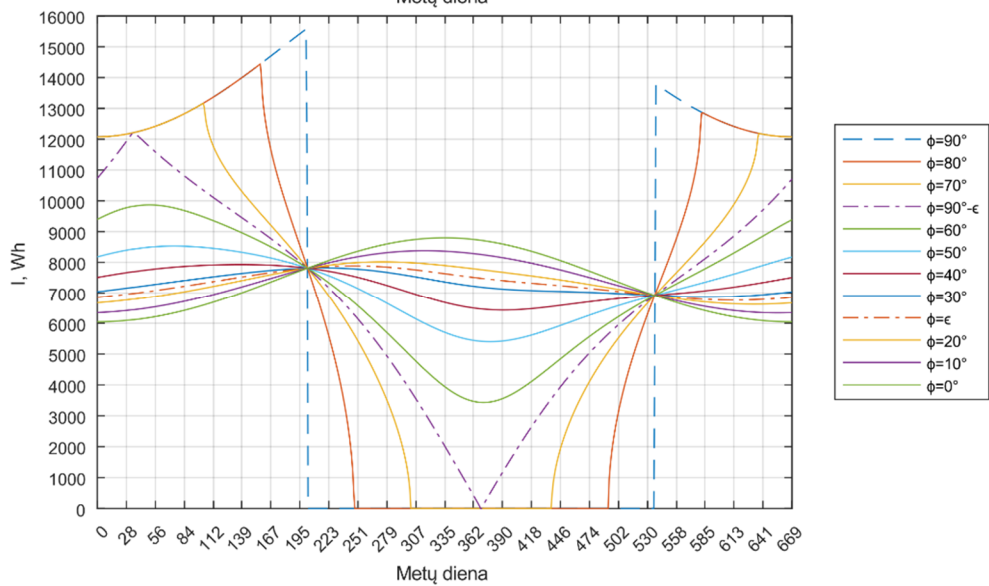
Iš 2.6 grafiko matytina, kad Marso paviršiuje per vieną parą maksimaliai išgautina tik ~53% energijos nei jos maksimaliai išgautina Žemės planetoje, nors pastarosios para yra 2,84% trumpesnė. Cereros nykštukinėje planetoje per vieną parą maksimaliai išgautina tik ~5,2% maksimalaus energijos kiekio Žemės planetoje, tačiau para Žemėje trunka 2,637 karto ilgiau.

Dažnai pravartu žinoti suminę, per vienerius metus Saulės sistemos kūno paviršiaus ploto vienetą pasiekiančią saulės šviesos energiją. Šioms vertėms gauti jau buvo sudarytos visos reikalingos funkcijos, todėl sumuojant kiekvienos paros energijos reikšmes, sudaroma 2.2 lentelė.

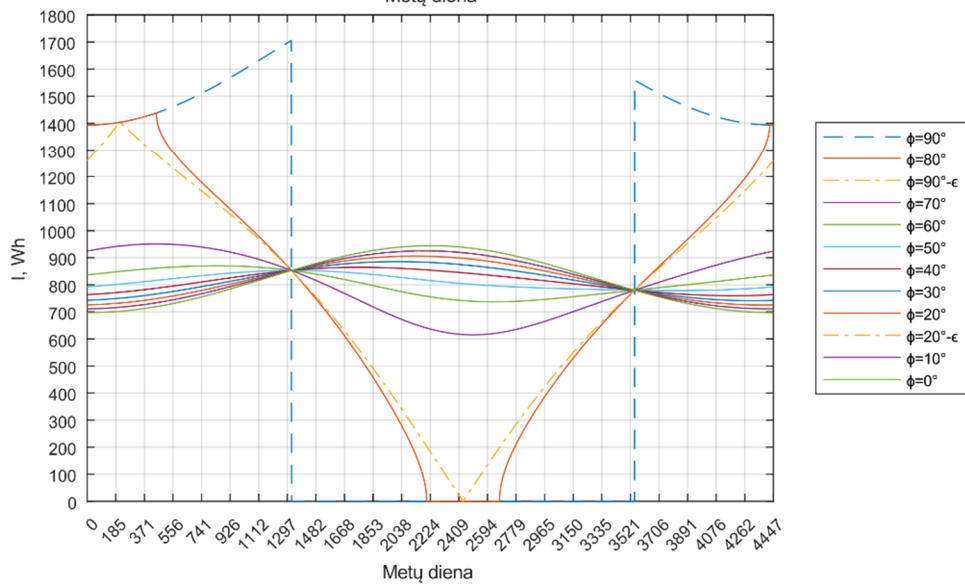
Iš 2.2 lentelės pastebėtina, kad Žemės, Marso ir nykštukinės Cereros planetų pietų kryptimi per vienerius siderinius metus išgautina daugiau energijos nei jų pusiaujo zonose ar šiaurės pusrutulyje. Tai nutinka todėl, kad pietų pusrutulyje dienos yra ilgesnės tuo metu, kai šios planetos yra arčiau Saulės, todėl jas pasiekia didesnis saulės šviesos energijos kiekis.



(a)



(b)



(c)

2.6 pav. Saulės šviesos energijos kiekis per vieną parą stačiu kampu krentantis į vieną kvadratinį metrą kūno paviršiaus tam tikrose geografinėse šiaurės pusrutulio platumose: (a) Žemės planetoje, (b) Marso planetoje ir (c) Cereros nykštukinėje planetoje

2.2 lentelė. Metinis į vieną Saulės sistemos kūno paviršiaus kvadratinį metrą krentantis saulės šviesos energijos kiekis geografinėse platumose, išdėstytose 10° intervalu

Saulės sistemos kūnas	$E_{metinis}(\phi)$, kWh									
	$\phi = < \dots >$									
	0°	10° –10°	20° –20°	30° –30°	40° –40°	50° –50°	60° –60°	70° –70°	80° –80°	90° –90°
Merkurijus*	21 351	21 351	21 351	21 351	21 351	21 351	21 351	21 351	21 351	42 704
Žemė	5 997,4	5 994,1 6 000,7	5 990,5 6 004,2	5 986,4 6 008,3	5 981,3 6 013,4	5 974,1 6 020,4	5 962,1 6 032,2	5 923,4 6 059,5	5 894,5 6 077,0	5 868,8 6 093,8
Marsas	4 949,5	4 927,6 4 971,5	4 904,1 4 990,4	4 877,1 5 022,0	4 843,1 5 055,9	4 794,9 5 104,1	4 710,0 5 188,9	4 510,4 5 382,6	4 424,8 5 465,4	4 392,2 5 494,5
Cerera	3 640,0	3 634,5 3 645,5	3 628,7 3 651,3	3 622,1 3 658,0	3 613,9 3 666,1	3 602,8 3 677,2	3 585,5 3 694,5	3 551,6 3 728,4	3 405,0 3 874,6	3 304,9 3 973,7

* Vertė per dvejus metus (viena Saulės para Merkurijuje trunka 2 jo siderinius metus)

Marso ir Žemės planetoms apskaičiuoti rezultatai nėra tikslūs, kadangi jos turi atmosferą, o saulės šviesa, iki pasiekdama planetos paviršių, joje yra sklaidoma ir sugerama, todėl jos srautas silpnėja. Atmosferos įtaka planetos paviršių pasiekiančiai saulės šviesai yra analizuojama 2.2. poskyryje.

2.1.4. Orbitinės nakties trukmė

Kosminiam aparatui skriejant orbita aplink Saulės sistemos kūną, jis didžiausią orbitinio periodo dalį praleidžia Saulės atokaitoje, tačiau tam tikrais laiko tarpais aparatas atsiduria kūno šešėlyje. Pastaruoju atveju energijos iš saulės šviesos gamyba sustoja, o jei energijos atsargų baterijose nepakanka iki aparatas vėl įskrieja į saulėtąją orbitos dalį, jo elektroninė įranga, o dėl to ir jis pats, gali būti prarastas. Norint parinkti pakankamos talpos baterijas svarbu žinoti, kiek laiko kosminis aparatas išbūna kūno šešėlyje. (1.27) nelygybe galima patikrinti, ar tam tikru β objekto orbitiniu kampu jis yra kūno šešėlyje. Vis dėlto kiekvieno orbitos taško tikrinimas nėra efektyvus būdas sprendiniams rasti, todėl MATLAB programinėje aplinkoje sudaroma funkcija $FindONA(a, l, R, R_o, eps, a0, No)$ orbitiniams aušros ir saulėlydžių kampams surasti. Jos kintamieji a – orbitinis Saulės sistemos kūno kampas, l – atstumas iki Saulės, R – Saulės sistemos kūno spindulys, R_o – objekto orbitos aplink Saulės sistemos kūną spindulys, eps – objekto orbitos ašies posvyris į kūno orbitos ašį, $a0$ – orbitinis Saulės sistemos kūno kampas tarp jo afelio ir objekto saulėgrįžos taškų bei No – objekto orbitų skaičius per vienerius kūno siderinius metus. Programinis funkcijos kodas pateiktas 5-ame priede.

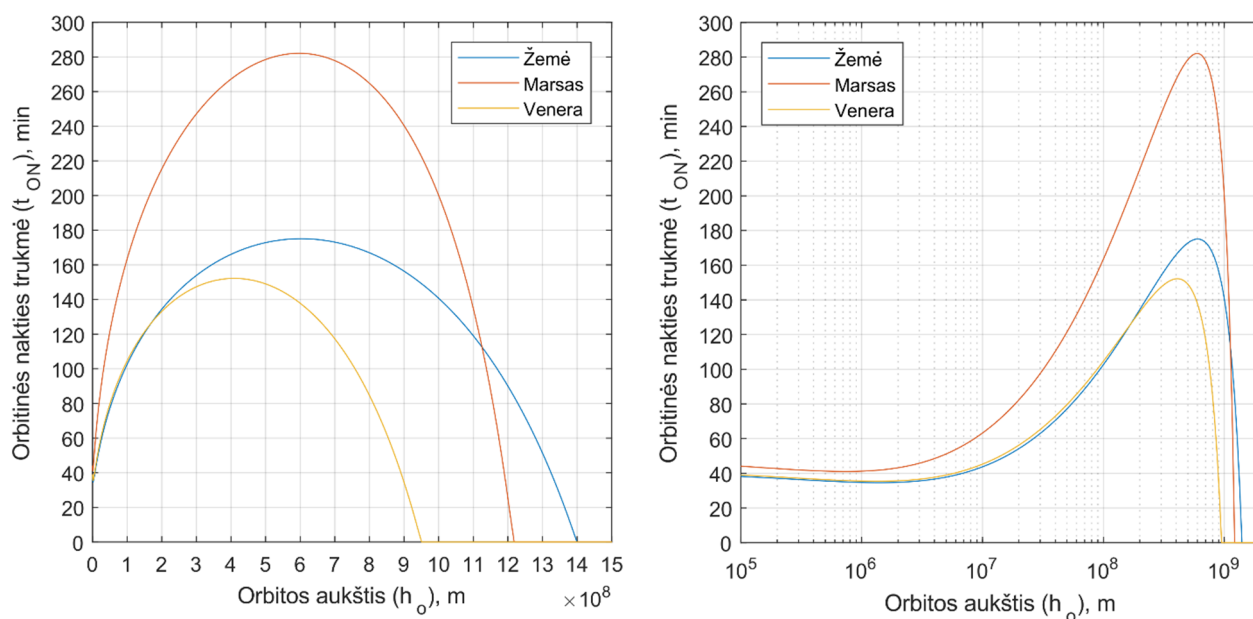
Objekto orbitų skaičius per vienerius kūno siderinius metus randamas kūno orbitinį periodą dalijant iš objekto orbitinio periodo, apskaičiuojamo (1.28) lygtimi, kai $\Delta\beta$ yra lygus 2π . Laiko tarp β_s ir β_a taškų apskaičiavimui MATLAB programinėje aplinkoje sudaroma funkcija $tCOAL(R_o, B_s, B_r, SSB)$, kurioje R_o yra objekto orbitos spindulys, B_s ir B_r yra atitinkamai objekto orbitinis saulėlydžio ir aušros kampas radianais, o SSB – Saulės sistemos kūno raidinis atitikmuo. SSB gali būti: 'Me' – Merkurijus, 'Ve' – Venera, 'Z' – Žemė, 'Ma' – Marsas, 'Vst' – Vesta, 'C' – Cerera, 'J' – Jupiteris, 'S' – Saturnas, 'U' – Uranas, 'N' – Neptūnas, 'P' – Plutonas, 'E' – Eridė. Funkcijos programinis kodas pateiktas 6-ame priede.

Naudojantis sudarytomis funkcijomis, gali būti analizuojama objekto orbitinės nakties trukmės priklausomybė nuo jos parametrų. Remiantis (1.27), (1.28) ir (1.21) lygtimis, ji priklauso nuo orbitos posvyrio ϵ , spindulio R_o , ir orbitinio Saulės sistemos kūno kampo tarp jo afelio ir objekto saulėgrįžos taškų α_0 . Likę R , l ir M parametrai priklauso nuo Saulės sistemos kūno, aplink kurį skrieja objektas, bei šio kūno orbitinės padėties α . Parametro α_0 įtaka pastebima tik analizuojant laiką, išbūtą kūno šešėlyje vienerių metų laikotarpiu, ir tik elipsiškoms kosminio aparato orbitoms. Parametrų ϵ ir R_o įtaka pastebima ir vienos orbitos skalėje, todėl šiame punkte yra analizuojama būtent jų įtaka objekto orbitinės nakties trukmei.

2.7 paveiksle yra pavaizduotas objekto orbitinės nakties trukmės priklausomybės nuo jo orbitos aukščio h_o , kur $h_o = R_o - R$, grafikas Veneros, Žemės bei Marso planetoms. Jį sudaro dvi dalys, kuriose tie patys rezultatai pavaizduoti tiesinėje bei logaritminėje skalėse. Brėžiant šį grafiką parametras ϵ laikomas lygus 0, todėl ir $\alpha_0 = 0$.

2.7 grafike matytina, kad kosminiam aparatui skriejant nuo 100 km iki 1000 km aukščiau virš kūno paviršiaus, orbitinės nakties trukmė nežymiai trumpėja. Tai atsitinka todėl, kad aukštesnės orbitos lankas, kuriame objektas yra užstojamas šešėlio, trumpėja greičiau nei lėtėja orbitinis greitis. Pagal (1.23) lygtį, tolstant nuo kūno, palydovo orbitinis greitis mažėja, todėl ilgėja laikas, išbūtas kūno šešėlyje. Ši vertė didėja iki tam tikro taško, kuriame pasiekiamas orbitinės nakties trukmės maksimumas. Pastarasis priklauso nuo keleto parametrų: kūno masės, spindulio ir atstumo iki Saulės. Marso planetos atveju didžiausią įtaką daro jo masė – dėl mažesnės masės palydovo orbitinis greitis yra mažesnis, todėl ilgesnis yra laikas, išbūtas kūno šešėlyje. Veneros atveju didžiausią įtaką, lyginant su Žeme, turi jos nuotolis nuo Saulės. Kaip paminėta 1-ojo skyriaus 2-ojo poskyrio 4-ajame punkte, bet kuris Saulės sistemos kūnas yra mažesnis už Saulę, todėl jo šešėlis nėra begalinio ilgio, o tolstant nuo kūno, jo šešėlio plotis mažėja. Dėl šios priežasties Veneros šešėlis yra trumpesnis. Vis dėlto Marso planetos atveju jo šešėlio ilgis yra mažesnis nei Žemės, nors šis už pastarąją yra apytiksliai 1,52 karto toliau. Taip atsitinka todėl, kad kūno šešėlio ilgis priklauso ir nuo kūno dydžio, o Marso skersmuo yra apytiksliai 1,88 karto mažesnis už Žemės skersmenį.

2.7 paveiksle matytina, kad Žemės ir Veneros kreivės yra panašios. Taip yra todėl, kad abi šios planetos yra panašios dydžiu bei mase. Kreivių atsiskyrimas įvyksta dėl skirtingų šių planetų nuotolių nuo Saulės.



2.7 pav. Orbitinės nakties trukmės priklausomybė nuo orbitos aukščio Veneros, Žemės ir Marso planetoms

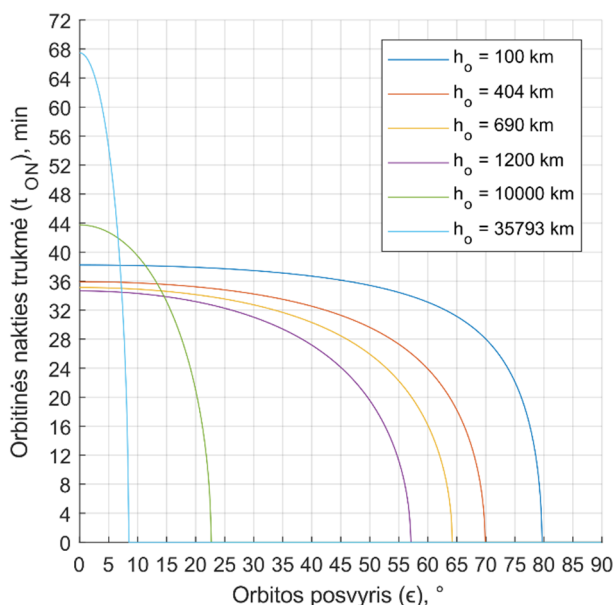
Analizuojant orbitinės nakties trukmę pravartu iširti strategiškai svarbius nuotolius. Žemės planetoje jie yra: $h_o \approx 404$ km, kuriame skrieja Tarptautinė Kosminė Stotis, $h_o = 35\,793$ km arba geosinchroninėje orbitoje (GSO), kurioje kosminio aparato orbitinis periodas yra lygus vienai Žemės parai ir $h_o = 384\,400$ km, kuris atitinka vidutinį Mėnulio nuotolį. Marso areosinchroninės¹⁰ orbitos aukštis lygus 17 039 km, o didžiausias jo palydovas – Fobas – yra nutolęs per 9 377 km. Venera natūraliųjų palydovų neturi, todėl vienintelis strategiškai svarbus nuotolis yra geosinchroninės orbitos aukštis, lygus 1 529 629 km. Paminėtina, kad Veneros sukimosi kryptis yra priešinga jos skriejimo orbitoje kryptiai, o analizuojant jos sukimosi kryptimi skriejančius palydovus, jų orbitos posvyris ϵ turi būti ne mažesnis nei 180° [59].

Apskaičiavus orbitinės nakties trukmę ankstesniame paragrafe paminėtais atstumais, gaunami toliau išvardinti rezultatai. 404 kilometrų virš Žemės paviršiaus atstumu orbitinė naktis trunka 35 minutes 54 sekundes ir 77 šimtąsias. Geosinchroninėje Žemės orbitoje orbitinė naktis trunka 67 min. 28 s. ir 10 šimtųjų. Mėnulio atstumu orbitinė naktis trunka 164 minutes 33 sekundes ir 30 šimtųjų. Paminėtina, kad Mėnulio užtemimo trukmė yra mažesnė, kadangi ji matuojama, kol visas kūnas yra šešėlyje, tačiau šiame darbe gautos reikšmės pritaikomos nedidelio ploto paviršiaus vienetams ir

¹⁰ Areosinchroninė orbita – Geosinchroninė orbita aplink Marso planetą.

taškiniais kūnams. Marso planetos areosinchroninėje orbitoje naktis trunka 25 min. 18 s. ir 84 šimtąsias, o jo palydovo Fobo atstumu – 20 minučių ir 16,5 sekundės. Venera aplink savo ašį apsisuka per 2 802 valandas. Tai yra labai didelis laiko tarpas, todėl palydovas turi skristi lėtai, o jo orbita būti labai aukšta. Sinchroninis greitis pasiekiamas, kai kosminis aparatas yra 1 529 629 kilometrų nuotoliu nuo kūno paviršiaus, tačiau Veneros šešelis yra maždaug 956 tūks. kilometrų ilgio, todėl geosinchroniniu atstumu nuo Veneros skriejantis objektas į jos šešėlį nepakliūva.

Objekto orbitinės nakties priklausomybės nuo jo orbitos plokštumos posvyrio į kūno orbitos plokštumą tyrimas atliekamas Žemės planetai $h_o = \{100; 404; 690; 1\ 200; 10\ 000; 35\ 793\}$ kilometrų aukščiuose virš jos paviršiaus. Kiekvienas iš šių aukščių atitinkamai parodo: Karmano liniją – ribą tarp Žemės atmosferos ir kosmoso, Tarptautinės Kosminės Stoties skriejimo aukštį, egzosferos – išorinio Žemės atmosferos sluoksnio – pradžia, žemosios Žemės orbitos ribą, egzosferos pabaigą bei geosinchroninės orbitos aukštį. Rezultatus iliustruojantis grafikas pateiktas 2.8 paveiksle.

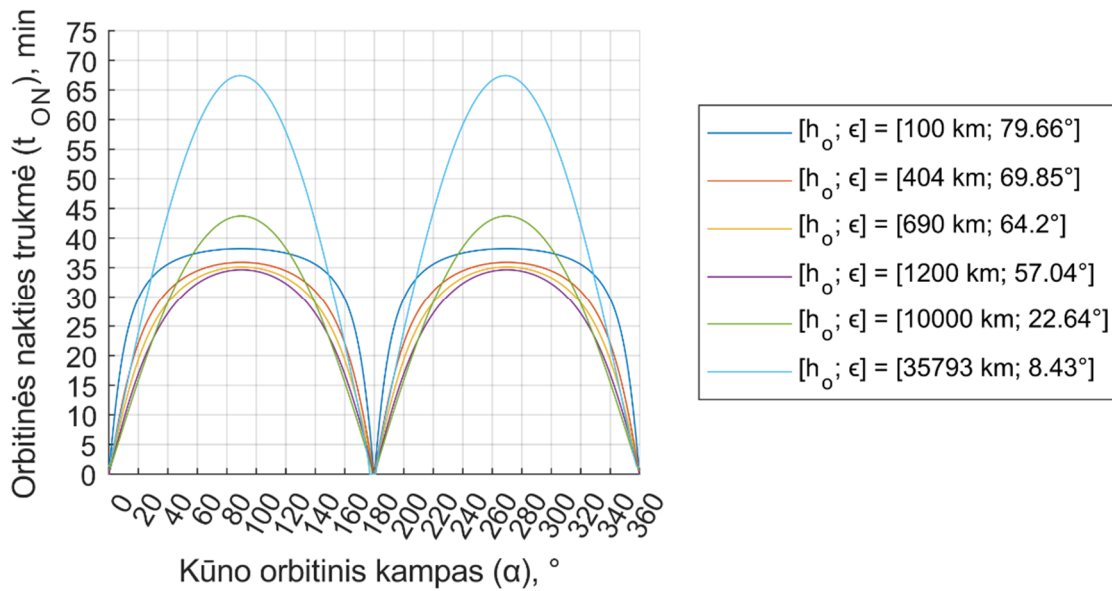


2.8 pav. Orbitinės nakties trukmės priklausomybė nuo orbitos posvyrio.

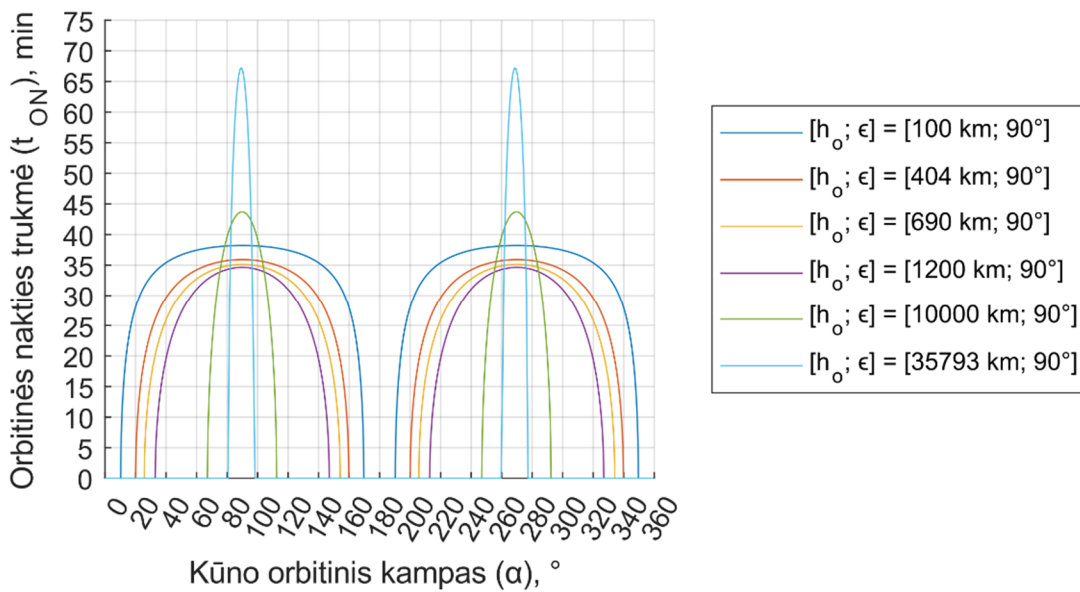
Iš grafiko matytina, kad aukštesnei orbitai jos posvyris turi būti mažesnis, norint vieno orbitinio periodo metu nepatekti į kūno šešėlį. Grafike matomos kreivės nulinę ribą kerta taškuose $\epsilon = \{79,66^\circ; 69,85^\circ; 64,20^\circ; 57,04^\circ; 22,64^\circ; 8,43^\circ\}$. Vis dėlto net ir tokiose orbitose objektas tam tikrais siderinių metų laikotarpiais atsiduria kūno šešėlyje. 2.9 paveikslas iliustruoja tris atvejus: (a) – kai orbitos posvyrio kampai yra ribiniai, t.y. tokie, kuriuose 2.8 paveikslo kreivės kerta nulinę ribą, (b) – kai orbitos posvyris yra lygus 90° , ir (c) – kai kūno ir objekto orbitų plokštumos sutampa ($\epsilon = 0^\circ$).

Iš 2.9 grafiko (a) dalies matoma, kad ribiniais objekto orbitos posvyrio kampais, pateiktais ankstesniame paragrafe, objektas vieno orbitinio periodo metu į kūno šešėlį nepakliūva tik du kartus

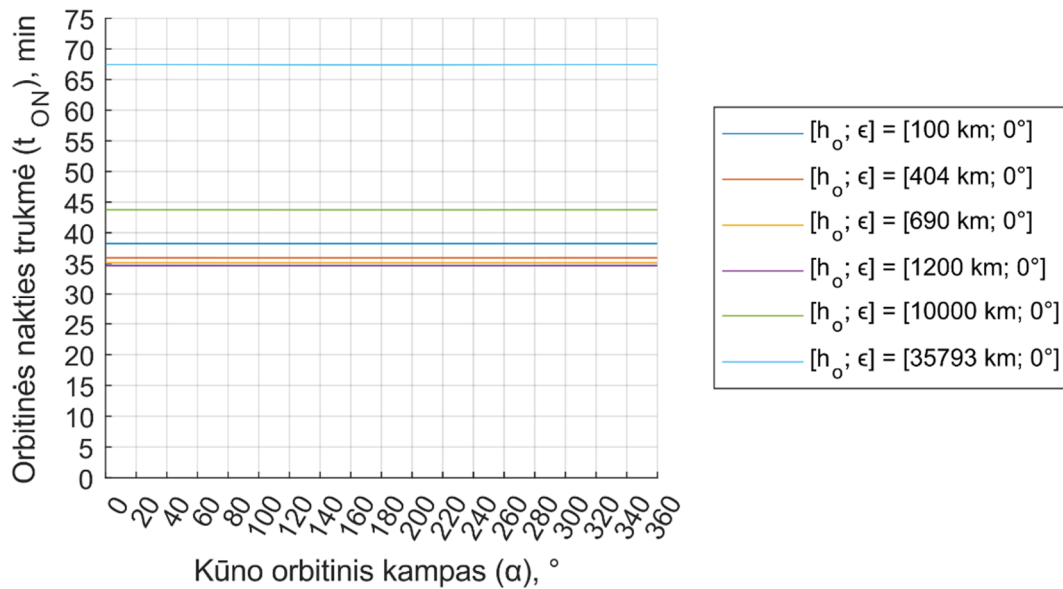
per vienerius kūno siderinius metus, o orbitinės nakties trukmės pikas pasiekiamas orbitiniuose lygiadienio taškuose, kurie yra išsidėstę $\alpha = 90^\circ$ ir $\alpha = 270^\circ$ orbitiniais kampais. (b) dalyje matoma, kad skriejant orbita, kurios posvyris ϵ yra lygus 90° , objektas į kūno šešėlį pakliūva rečiau, tačiau jos maksimali trukmė nesikeičia. Kuo aukštesnė orbita, tuo mažiau orbitinių periodų (orbitinių parų), kuriose objektas atsiduria kūno šešėlyje. Maksimali orbitinės nakties trukmė įvyksta objekto orbitiniuose lygiadienio taškuose, taip pat kaip ir (a) dalyje. 2.9 grafiko (c) dalyje objekto orbitos plokštuma sutampa su kūno orbitos plokštuma ($\epsilon = 0^\circ$), todėl kiekvienos orbitinės paros metu egzistuoja laiko tarpas, kurio metu objektas yra kūno šešėlyje. Pastebėtina, kad šiuo atveju orbitinės nakties trukmė kinta tik nuo orbitos aukščio virš kūno paviršiaus h_o .



(a)



(b)



(c)

2.9 pav. Orbitinés nakties trukmės priklausomybė nuo orbitos posvyrio per vienerius kūno metus

2.1.5. Poskyrio išvados

1. Saulės šviesos energinės apšvietos dydis, pasiekiantis dangaus kūną ar dirbtinį palydovą, yra atvirkščiai proporcingas jo atstumo iki Saulės kvadratui:

1.1. Vidutiniame Žemės planetos nuotolyje nuo Saulės energinė apšvieta yra lygi $1361,5 \text{ W/m}^2$, o vidutiniame Marso nuotolyje – $591,55 \text{ W/m}^2$ arba 43,5% vertės Žemėje. Vidutiniame Jupiterio, kurio orbitoje skrieja dirbtinis palydovas Junona¹¹, nuotolyje nuo Saulės, energinės apšvietos dydis siekia tik 3,7% vertės Žemėje, arba $50,408 \text{ W/m}^2$. Arčiausiai bei toliausiai nuo Saulės esančių kūnų – Merkurijaus bei Eridės – vidutiniuose nuotoliuose pasiekiami atitinkamai $9484,9 \text{ W/m}^2$ ir $0,36452 \text{ W/m}^2$, prilygstančių 697% ir 0,027% Saulės energinės apšvietos vertės vieno astronominio vieneto¹² atstumu nuo Saulės;

1.2. Saulės sistemos kūnai aplink Saulę skrieja elipsine orbita, todėl skirtinguose orbitos taškuose atstumas tarp jų yra skirtingas. Tai lemia nevienodą juos pasiekiančią Saulės energinę apšvietą skirtingomis šio kūno metų dienomis. Žemės planetoje didžiausia ir mažiausia energinės apšvietos vertės skiriasi 6,7%, o Marse – 37,7%. Mažiausiai elipsiška orbita aplink Saulę skrieja Venera, o labiausiai – Eridė. Didžiausia ir mažiausia šiuos kūnus pasiekianti energinė apšvieta skiriasi atitinkamai 2,7% ir 216%;

2. Energijos kiekis, per vieną parą išgautinas tam tikrą Saulės sistemos kūnų paviršiuje, tiesiogiai priklauso nuo jų šviesiojo paros meto trukmės, o ši – nuo kūno sukimosi greičio, sukimosi ašies posvyrio į orbitos ašį ϵ , stebėtojo geografinės padėties ϕ bei kūno padėties orbitoje aplink Saulę:

2.1. Merkurijaus para trunka 4222h 30min, o Cereros – tik 9h 4min 34s. Stebint iš šių kūnų pusiaujo zonų, šviesusis paros metas juose trunka pusė paros, todėl laikant, kad juos pasiekia vienodo dydžio energinė apšvieta, Merkurijuje per vieną parą pavyktų išgauti ~465 kartus daugiau energijos nei Cereroje. Iš tikrųjų Merkurijuje per vieną parą pavyktų išgauti daugiau nei 26 tūkstančius kartų daugiau energijos, kadangi šis yra 7 kartus arčiau Saulės;

2.2. Kai kūno sukimosi ašis yra pasvirusi į jo orbitos ašį, t.y. nėra jai lygiagreti, šviesiojo paros meto trukmė priklauso nuo šio posvyrio kampo, stebėtojo geografinės platumos ir kūno padėties orbitoje aplink Saulę. Pusiaujo zonoje ($\phi = 0$) Saulė danguje matoma pusė paros trukmės, nesvarbu kokia kūno padėtis orbitoje. $\epsilon - 90^\circ < \phi < 90^\circ - \epsilon$ atveju dienos trukmė kinta nuo kūno padėties orbitoje, $\phi = \pm(90^\circ - \epsilon)$ atveju egzistuoja viena metų para, per kurią Saulė virš horizonto nepakyla (nenusileidžia), o dar labiau šiaurėje (pietuose) tokių parų skaičius didėja. Šiaurės ir pietų ašigaliuose vieneri sideriniai¹³ metai trunka vieną naktį ir vieną dieną;

¹¹ Junona (angl. *Juno*) – Šiuo metu (2017 m.) toliausiai nuo Saulės esantis dirbtinis palydovas, visiems energijos poreikiams patenkinti naudojantis tik saulės šviesos energiją.

¹² Astronominis vienetas – vidutinis atstumas tarp Saulės ir Žemės. $1 \text{ av} = 149\,597\,870 \text{ km}$.

¹³ Sideriniai metai (taip pat žvaigždiniai metai) yra laiko tarpas, per kurį dangaus kūnas (palydovas) apkeliauja pagrindinį dangaus kūną, pvz., Žemę apkeliauja ekliptiką aplink Saulę.

2.3. Merkurijaus planetos sukimosi ašis yra lygiagreti jo orbitos ašiai, todėl Saulė dangaus skliaute matoma pusė paros, nepriklausomai nuo stebėtojo geografinės padėties, išskyrus $\phi = \pm 90^\circ$ atvejį, kai Saulė horizonto kryptimi matoma nuolatos;

3. Energijos kiekis, išgautinas Saulės sistemos kūnų paviršiuje per vienerius siderinius metus, priklauso nuo stebėtojo geografinės platumos, tačiau iš esmės skirtumus lemia šių kūnų orbitiniai parametrai. Žemė, Marso ir nykštukinėje Cereros planetose per vienerius siderinius metus energijos daugiau išgautina pietų pusrutulyje, kadangi jame dienos yra ilgesnės tuo metu, kai šie kūnai yra arčiau Saulės, todėl juos pasiekia didesnis saulės šviesos energijos kiekis. Didžiausias ir mažiausias energijos kiekiai yra pasiekiami ašigalių taškuose. Lyginant Žemės, Marso ir Cereros šiaurės ašigaliuose per vienerius siderinius metus išgautiną saulės šviesos energiją su vertėmis, apskaičiuotomis jų pusiaujo zonoms, jų santykiai atitinkamai lygūs: 97,86%, 88,74% ir 90,79%. Lyginant rezultatus pietų ašigalyje, šie atitinkamai lygūs: 101,6%, 111,0% ir 109,2%;

4. Kosminiam zondui skriejant Saulės sistemos kūno orbitoje, jis bent du kartus per metus atsiduria šio kūno šešėlyje, todėl tuo metu energijos iš saulės šviesos gamyba sustoja. Jei energijos atsargų baterijose neužtenka iki kol aparatas vėl įskrieja į saulėtąją zoną, jo sistemos gali sugesti, o pats prietaisas būti prarastas. Orbitinės nakties trukmė labiausiai priklauso nuo penkių parametru: kūno, aplink kurį skriejama, masės, skersmens ir nuotolio nuo Saulės bei kosminio aparato orbitos spindulio (aukščio) ir orbitos posvyrio:

4.1. Kuo didesnė kūno masė, tuo greičiau turi skrieti palydovas tam, kad išliktų jo orbitoje. Greičiau skriejantis objektas kūno šešėlį įveikia per mažesnę laiko tarpą;

4.2. Kūno šešėlio dydis yra tiesiogiai proporcingas šio kūno skersmeniui, todėl didesnio kūno šešėlis yra didesnis ir jį įveikti užtrunkama daugiau laiko;

4.3. Kuo kūno nuotolis nuo Saulės yra didesnis, tuo jo šešėlis trumpesnis, todėl pastovaus aukščio orbita skriejančio kosminio aparato orbitinė naktis yra trumpesnė;

4.4. Kosminio zondo orbitinis greitis yra atvirkščiai proporcingas orbitos spinduliui (aukščiui), todėl didesniu atstumu nuo kūno esantis zondas pastovaus ilgio šešėlį įveiks lėčiau nei esantis arčiau kūno;

4.5. Kosminio zondo orbitos posvyris nedaro didelės įtakos nakties trukmei, tačiau didinant šį posvyrį, mažėja orbitų skaičius, kurių metu zondas patenka į kūno šešėlį;

4.6. 404 kilometrų atstumu virš Žemės paviršiaus, kuriame skrieja Tarptautinė kosminė stotis, orbitinė naktis trunka 35 minutes ir 55 sekundes. Geosinchroninėje Žemės orbitoje orbitinė naktis trunka 67 min. ir 28 s. Mėnulio atstumu orbitinė naktis trunka 164 minutes ir 33 sekundes. Marso planetos areosinchroninėje¹⁴ orbitoje naktis trunka 25 min. ir 19 s., o jo palydovo Fobo atstumu –

¹⁴ Areosinchroninė orbita – Geosinchroninė orbita aplink Marso planetą.

20 minučių ir 17 sekundžių. Geosinchroninėje Veneros orbitoje skriejantis objektas į jos šešėlį nepakliūva;

2.2. Atmosferos įtakos ją kertančiai šviesai tyrimas

2.2.1. Žemės ir Marso atmosferų funkcijos

(1.56) lygtis slėgio kitimą aprašo skirtingose logaritmo skalėse, todėl išvesti bendrąją atmosferos slėgio matematinę lygtį nėra lengva. Kitu atveju ji gali būti išskirstyta į atskiras dalis kiekvienam atmosferos regionui, tačiau tada atmosferos skaičiavimai taip pat turi būti dalijami į atskiras dalis. Programiškai tokią atmosferos slėgio funkciją užrašyti nėra sudėtinga, be to, jai gali būti taikomi aritmetiniai veiksmai, tarp jų ir integravimas. 7-ame priede yra pateiktas „MATLAB“ programavimo aplinkos kodas *EarthAtmosphere(h)* funkcijai, apskaičiuojančiai Žemės planetos geopotencialinę altitudę $z^{[Z]}$, absoliučiąją atmosferos temperatūrą $T^{[Z]}$ ir atmosferos tankį $P^{[Z]}$ pagal geometrinį aukštį virš jūros lygio $h^{[Z]}$. Ši funkcija užrašyta taip, kad veiktų ir neigiamai arba didesnei nei 86 000 metrų altitudės reikšmei. Paminėtina, kad h esant didesniai nei 100 km, šia funkcija gauti rezultatai nėra tikslūs, nes termosferoje – atmosferos sluoksnyje, esančiame virš mezosferos, temperatūra kinta labai sparčiai. Vis dėlto šiame darbe skaičiavimai termosferoje nėra vykdomi.

Šiame darbe laikoma, kad Marso atmosferos aukštis (storis) yra toks, kuriame slėgis pasiekia mezopauzės bazinį slėgį Žemės planetoje. Remiantis 1.3 lentele šis dydis lygus 0,373 38 Pa. Marso atmosferos geometriniam aukščiui surasti „GAMS“ matematinio modeliavimo terpėje sudaroma speciali programa. Šios programos kodas yra pateiktas 8-ame priede, o gauti rezultatai lygūs:

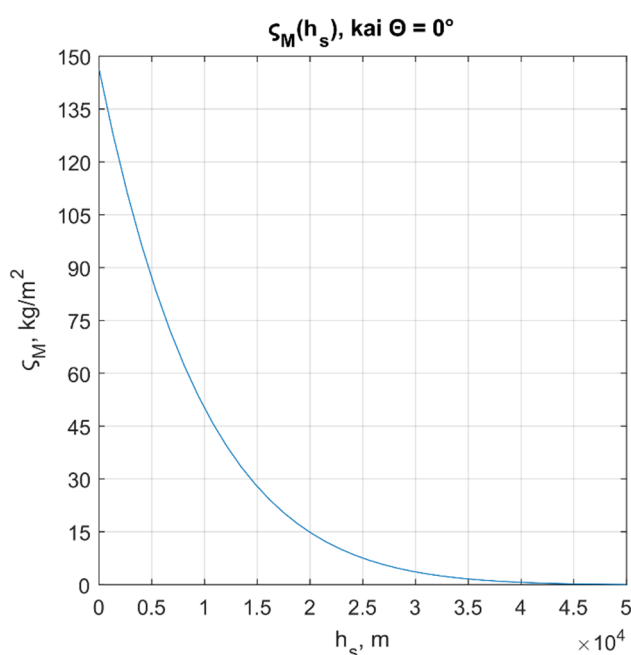
```
VARIABLE h.L = 53789.195 Atmosferos storis
VARIABLE X.L = 0.000 Paklaida
```

Iš gauto rezultato matoma, kad Marso atmosfera nėra tokia plona, kaip gali atrodyti iš pirmojo žvilgsnio, ir yra lygi 53789 m. Turint šį rezultatą, „MATLAB“ programavimo aplinkoje užrašoma *MarsAtmosphere(h)* funkcija, kurios kintamasis yra $h^{[M]}$, o rezultatai: geopotencialinė altitudė $z^{[M]}$, absoliučioji atmosferos temperatūra $T^{[M]}$ ir atmosferos tankis $P^{[M]}$. Šia funkcija skaičiavimai vykdomi remiantis (1.55) ir (1.56) išraiškomis, o jos programinis kodas pateiktas 9-ame priede.

2.2.2. Absoliučioji oro masė

Absoliučioji oro masė ζ apskaičiuojama pagal (1.65) formulę, kuri taip pat yra užrašoma „MATLAB“ programavimo aplinkoje bei išskviečiama su komanda $AbsAirMass(h_s, Th, Pl)$. Čia h_s – stebėtojo altitudė h_s , Th – zenitinis kampas θ , o parametras Pl – planetos raidinis atitikmuo. Pl reikšmė gali būti 'M' Marsui ir bet kokia kita Žemei. Funkcijoje stebėtojo aukštis yra programiškai ribojamas $h_s \in [-610; 86\ 000]$ Žemės planetai ir $h_s \in [0; 537\ 90]$ Marso planetai. Jos programinis kodas pateiktas 10-ame priede.

Naudojantis sudarytomis funkcijomis, Marso planetai nubrėžiami absoliučiosios oro masės priklausomybes nuo stebėtojo altitudės (žr. 2.10 pav.) ir zenitinio kampo (žr. 2.11 pav.) grafikai. 2.12 paveikslas iliustruoja, kaip absoliučioji oro masė kinta nuo abiejų parametru.



2.10 pav. Absoliučiosios Marso oro masės priklausomybė nuo stebėtojo altitudės

priklausomybė nuo θ kampo eksponentiškai mažėja. Taip atsitinka dėl to, kad didesniame aukštyje atmosfera yra nebe tokia tanki, todėl ir visa oro masė, esanti virš stebėtojo, yra lengvesnė.

1-ojo skyriaus 2-ojo poskyrio 2-ajame punkte paminėta, kad nuo stebėtojo altitudės taip pat priklauso ir maksimalaus zenitinio kampo θ_{max} dydis, kuris jūros (nulinės atskaitos) lygyje yra lygus 90° , bet didesniame aukštyje šią vertę viršija. 1.2.2. punkte įrodyta, kad $\theta > 90^\circ$ atveju oro masės vertė yra didesnė nei horizonto kryptimi, tačiau *AbsAirMass()* funkcija didesniems nei 90° zenitiniams kampams pateikia klaidingą atsakymą, todėl joje kampas programiškai ribojamas iki 90° . Šis rezultatų neatitikimas atsiranda todėl, kad (1.65) formulė yra gauta diferencijuojant (1.53) išraišką, o šiame procese prarandamas $[-(R + h_s) \cos \theta]$ narys. Papildytosios absoliučiosios oro masės funkcijos *AbsAirMassExt(hs, Th, hh, Pl)* programinis kodas yra pateiktas 11-ame priede. Šioje funkcijoje įvedamas papildomas kintamas *hh*, nurodantis matomojo horizonto altitudę h_h (žr. 1.13 pav.) Maksimaliam zenitiniam kampui rasti „MATLAB“ matematinio programavimo aplinkoje sudaroma funkcija *MaxTheta(hs, hh, Pl)*, kurios kintamieji yra tokie patys kaip ir kitų šiame punkte sudarytų funkcijų, o pati funkcija yra naudojama *AbsAirMassExt()* f-jos viduje. Jos programinis kodas pateiktas 12-ame priede.

Marso Olimpo kalno – aukščiausio Saulės sistemos vulkano – viršūnėje esantis stebėtojas ($h = 21\,229$ m) saulėlydžio ar saulėtekio metu Saulę horizonte matytų 96.396° zenitiniu kampu. Tokiu kampu krentantys spinduliai kerta 46,41 karto didesnę oro masę nei Saulę stebint nulinės atskaitos lygyje zenito kryptimi, kai spinduliai per atmosferą krenta stačiu kampu. Šios reikšmės gautos pasinaudojant naujai sukurtomis formulėmis „MATLAB“ programinėje aplinkoje ir užduočių lange įvykdant šias komandines eilutes:

```
HE = 21229;
THM = MaxTheta(HE, 0, 'M')
M = AbsAirMassExt(HE, THM, 0, 'M') / AbsAirMass(0, 0, 'M')
```

2.2.3. Atmosferos optinis pralaidumas

(1.30) lygtis teigia, kad optinis pralaidumas \mathcal{T} laipsniškai priklauso nuo optinio gylio τ . Optinis gylis priklauso nuo atmosferos komponentų – šviesą sugeriančių ir sklaidančių cheminių elementų ar jų junginių – optinių gylių τ_i sumos. Remiantis (1.31) lygtimi, optinio gylio koeficientai kiekvienai iš komponentų priklauso nuo jų ekstinkcijos ploto σ_i bei šios medžiagos koncentracijos n_i šviesos spindulio kelyje. Šviesos spektrinės energinės apšvietos I priklausomybė nuo atmosferos komponentų optinių gylių τ_i , gauta remiantis (1.30) ir (1.31) išraiškomis, yra pateikta (2.5) lygtyje, žemiau.

$$\begin{aligned}\frac{I}{I_0} &= \mathcal{T} = e^{-\tau} \\ I &= \mathcal{T}I_0 = e^{-\tau} \cdot I_0 \\ I &= I_0 e^{-\sum_{i=1}^N \tau_i}\end{aligned}\quad (2.5)$$

Čia: I_0 – atmosferą pasiekianti spektrinė energinė apšvieta, $W \cdot nm^{-1}/m^2$;
 N – komponentių skaičius;
 i – komponentės indeksas.

Kaip paminėta anksčiau, atmosferos komponentių optinis gylis priklauso nuo jų ekstinkcijos ploto, tačiau fotometrijos duomenų bazėse šis dydis pateikiamas retai. Viešai prieinamoje spektroskopijos duomenų bazėje „HITRAN“ – <http://hitran.org/> – yra pateikiami atskirų cheminių elementų ar jų junginių spektrinių linijų intensyvumai S_ν , matuojami $cm^{-1}/(molekulė \cdot cm^{-2})$, šių linijų numeriai ν , matuojami cm^{-1} , bei Lorencio pasiskirstymo pusiniai savitojo nuokrypio koeficientai γ_{self_ν} , matuojami cm^{-1}/atm . Pateikiamų parametų yra gerokai daugiau, tačiau tik įvardintieji yra naudojami tolimesniam ekstinkcijos plotui, kuris yra vienas iš optinio gylio parametų, apskaičiuoti.

Remiantis [58] literatūros šaltiniu, cheminio elemento ekstinkcijos plotas, naudojant „HITRAN“ duomenų bazėje pateikiamus dydžius, gali būti apskaičiuojamas (2.6) lygtimi:

$$\sigma_m(\nu) = \frac{N_A}{2\Delta\nu} \sum_k S_k \int_{\nu-\Delta\nu}^{\nu+\Delta\nu} L(\nu, \nu_k, \gamma_k) d\nu \quad (2.6)$$

Čia: $\sigma_m(\nu)$ – ν bangos numerio molinis ekstinkcijos plotas, cm^2/mol ;
 ν – bangos numeris, cm^{-1} ;
 $\Delta\nu$ – bangos numerių intervalas, cm^{-1} ;
 N_A – Avogadro konstanta. $N_A = 6,022\ 141\ 79 \cdot 10^{23} mol^{-1}$;
 S_k – k bangos numerio spektrinės linijos intensyvumas, $cm^{-1}/(molekulė \cdot cm^{-2})$;
 $L(\nu, \nu_k, \gamma_k)$ – Lorencio natūraliųjų dažnių pasiskirstymo funkcija.

Lorencio natūraliųjų dažnių pasiskirstymo funkcijos neapibrėžtinis integralas gali būti perrašytas (2.7) lygtimi:

$$\int_{\nu-\Delta\nu}^{\nu+\Delta\nu} L(\nu, \nu_k, \gamma_k) d\nu = \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{\nu - \nu_k}{\gamma_k} \right) \quad (2.7)$$

Tokiu atveju, (2.6) lygtis perrašoma į (2.8), kurioje σ_m išreiškiamas m^2/mol :

$$\sigma_m(\nu) = \frac{N_A}{2\pi\Delta\nu \cdot 10^4} \sum_k S_k \left[\tan^{-1} \left(\frac{\nu + \Delta\nu - \nu_k}{\gamma_k} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\nu - \Delta\nu - \nu_k}{\gamma_k} \right) \right] \quad (2.8)$$

13-ame priede pateiktas „MATLAB“ programinės aplinkos funkcijos, kuri iš „HITRAN“ duomenų bazės gautus tekstinių bylų duomenis kopijuoja į vidinį programos masyvą, kodas. Tokiu atveju, remiantis (2.8) lygtimi bei naudojant papildomas funkcijas, yra apskaičiuojami ir į atskiras tekstines bylas įrašomi moliniai cheminių elementų ekstinkcijos plotai. Tokie skaičiavimai užtrunka santykinai ilgai, tačiau byloje esančios reikšmės yra lengvai pasiekiamos ir greitai skaitomos. 14-ame priede pateiktas programos, kuri pagal aukščiau išvardytus žingsnius apskaičiuoja molinius azoto dujų ekstinkcijos koeficientus, kodas. Skaičiavimuose naudotos sąlygos: $2\,000\text{ cm}^{-1} \leq \nu \leq 100\,000\text{ cm}^{-1}$, $\Delta\nu = 0,1\text{ cm}^{-1}$, $\nu - 1\,000\text{ cm}^{-1} \leq \nu_k \leq \nu + 1\,000\text{ cm}^{-1}$.

Remiantis (1.31) ir (1.65) išraiškomis, pritaikytomis homogeninėms terpėms, bei (1.35) ir (1.64) lygtimis, τ_i išreiškiamas taip:

$$\tau_i = \sigma_i n_i l = \sigma_i l N_A c_i = \frac{\sigma_i l N_A}{M_i h_A} \zeta = \frac{\sigma_{m_i} \chi_i \mathcal{M} h_A \zeta}{M_i h_A}$$

$$\tau_i = \frac{\zeta^2}{\zeta_{zen}} \cdot \frac{\sigma_{m_i} \chi_i}{M_i} \quad (2.9)$$

Čia: σ_i – i rūšies komponentų ekstinkcijos plotas, m^2 ;

n_i – i rūšies komponentų koncentracija, m^{-3} ;

l – spindulio optinio kelio ilgis terpėje, m;

N_A – Avogadro konstanta. $N_A = 6,022\,141\,79 \cdot 10^{23}\text{ mol}^{-1}$;

c_i – molinė i rūšies komponentų koncentracija, mol/m^3 ;

M_i – i rūšies komponentų molinė masė, kg/mol ;

ζ – absoliučioji oro masė, kg/m^2 ;

σ_{m_i} – i rūšies komponentų molinis ekstinkcijos plotas, m^2/mol ;

χ_i – santykinis i rūšies komponentų kiekis viename molyje medžiagos (atmosferos dujų);

h_A – atmosferos aukštis, m;

\mathcal{M} – santykinė oro masė;

ζ_{zen} – absoliučioji oro masė zenito kryptimi, kg/m³.

Bendrasis atmosferos optinis gylis apskaičiuojamas (2.10) formule:

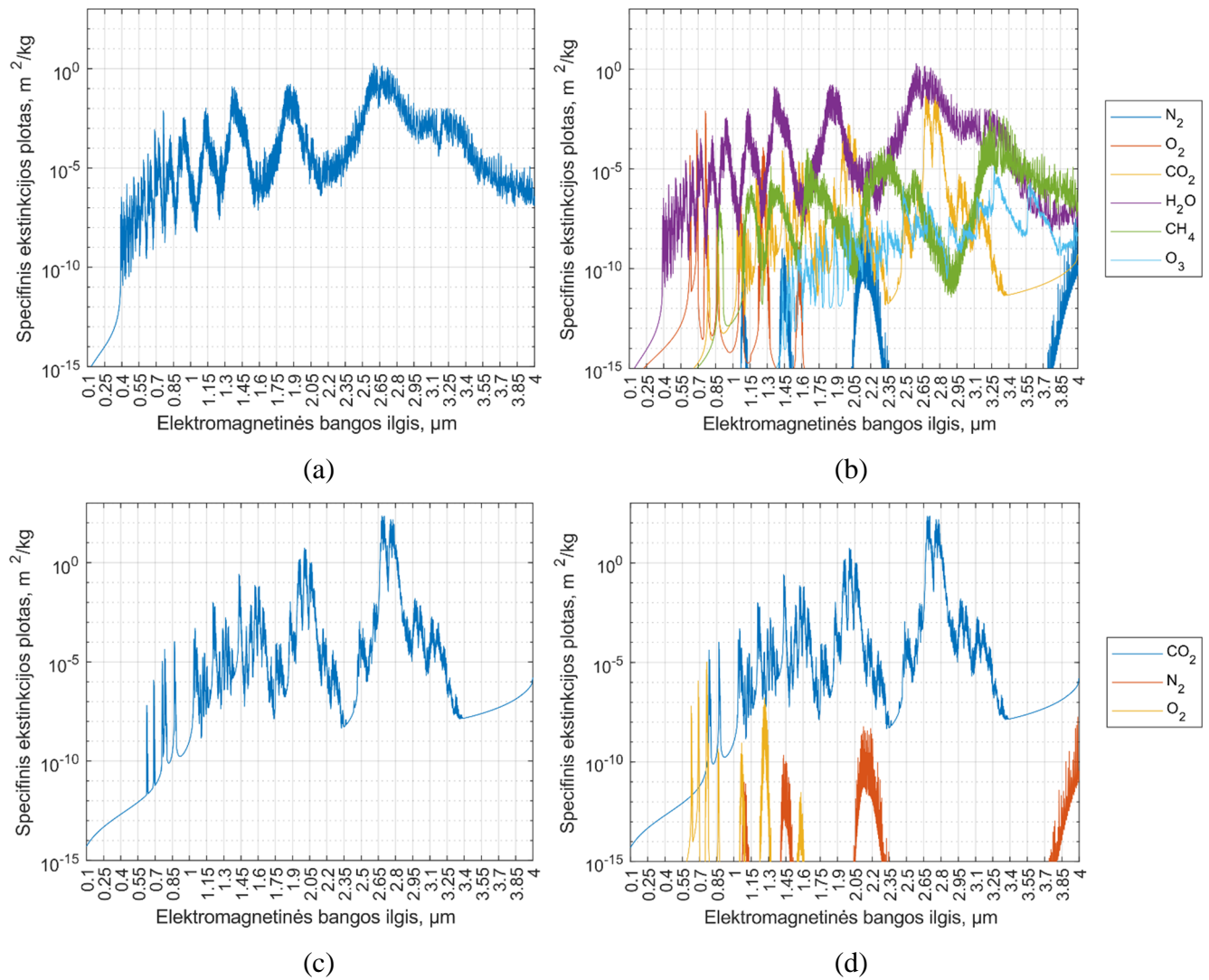
$$\tau = \sum_i^N \tau_i = \sum_i^N \frac{\zeta^2}{\zeta_{zen}} \cdot \frac{\sigma_{m_i} \chi_i}{M_i}$$

$$\tau = \frac{\zeta^2}{\zeta_{zen}} \sum_i^N \frac{\sigma_{m_i} \chi_i}{M_i} \quad (2.10)$$

Iš (2.10) lygties matoma, kad daugiklis ζ^2/ζ_{zen} yra bendras visoms komponentėms, todėl suminis atmosferos optinis gylis priklauso nuo $\sigma_{m_i} \chi_i/M_i$ santykio, kuris gali būti vadinamas specifiniu ekstinkcijos plotu ξ . Kadangi atmosferos ekstinkcija laipsniškai priklauso nuo optinio gylio, todėl 2.13 grafike nubrėžus specifinio ekstinkcijos ploto kreives atskiroms atmosferos komponentėms, matoma kiekvienos iš jų įtaka bendrajai atmosferinei ekstinkcijai. 2.3 lentelėje pateikti χ_i ir M_i parametrai Žemės bei Marso atmosferoms.

2.3 lentelė. χ_i ir M_i parametrai Žemės bei Marso atmosferoms

Žemė			Marsas		
i	χ_i , mol	M_i , kg/mol	i	χ_i , mol	M_i , kg/mol
N_2	0,780 84 [60]	0,028 013	CO_2	0,959 70 [37]	0,044 010
O_2	0,209 46 [60]	0,031 999	N_2	0,018 90 [37]	0,028 013
CO_2	0,000 40 [60]	0,044 010	O_2	0,001 46 [37]	0,031 999
H_2O	0,002 50 [60]	0,018 015			
CH_4	0,000 002 [60]	0,016 042			
O_3	0,000 001 [60]	0,047 998			



2.13 pav. Specifinio ekstinkcijos ploto ξ kreivės: (a) Žemės atmosferai, (b) atskiroms Žemės atmosferos komponentėms, (c) Marso atmosferai ir (d) atskiroms Marso atmosferos komponentėms

Gautajame grafike matytina, kad tiek Žemės, tiek Marso atmosferose mažiausiai šviesą sugeria azoto dujos. Didžiausią įtaką Marso planetos atmosferinei ekstinkcijai daro anglies dvideginio dujos, tačiau Žemėje gali būti išskirti du tokie cheminių elementų junginiai, tai – anglies dvideginis ir vandens garai. Atmosferinės ekstinkcijos pikai Žemėje pastebimi ties $\lambda = 1,375 \pm 0,075 \mu\text{m}$, $\lambda = 1,850 \pm 0,075 \mu\text{m}$ ir $\lambda = 2,650 \pm 0,100 \mu\text{m}$ bangos ilgiais, o Marso planetoje – ties $\lambda = 2,000 \pm 0,100 \mu\text{m}$ ir $\lambda = 2,750 \pm 0,100 \mu\text{m}$.

Analizuojant atskirų komponentių ekstinkciją, pastebėtina, kad azoto dujos yra beveik neaktyvios. Deguonies dujos yra silpnai aktyvios matomosios ir infraraudonosios šviesos diapazone. Vandens garų ekstinkcija pastebima visuose, išskyrus ultravioletinės šviesos, bangų ilgiuose, o anglies dvideginis, metanas ir ozonas aktyvūs tampa tik infraraudonųjų bangų zonoje. Pastebėtina, jog ozono ir metano koncentracijos Žemės atmosferoje yra nykstamai mažos, tačiau jų ekstinkcija vis vien yra didelė.

Paminėtina, kad 2.13 grafike nematoma ozono dujų įtaka šviesos ekstinkcijai regimųjų bei ultravioletinių bangų diapazonuose, nors realybėje šios dujos sugeria nemažą dalį per juos sklindančių bangų. Taip yra todėl, kad naudotoje duomenų bazėje minėtame elektromagnetinių bangų diapazone įrašų šioms dujoms nėra. Be to, šiame darbe neatsižvelgiama į Reili sklaidą (angl. *Rayleigh scattering*), kuri turi didelę įtaką didelio dažnio (trumpo bangos ilgio) elektromagnetinių bangų sklaidai.

Remiantis (2.10) lygtimi, „MATLAB“ programavimo aplinkoje sudaroma funkcija $OptDepth(hA, AAM, AAMzen, ECS, Mi, Xi)$, kurioje kintamasis hA reiškia atmosferos aukštį h_A , AAM – absoliučiąją oro masę spindulio kryptimi, $AAMzen$ – absoliučiąją oro masę zenito kryptimi, ECS – atmosferos komponentų molinių ekstinkcijos plotų masyvą, o Mi ir Xi – šių komponentų molinių masių (M) bei santykinio medžiagos kiekio (χ) vektorius. ECS masyvas yra $k \times i$ dydžio, kur i yra atmosferos komponentų skaičius, o k – bangų numerių skaičius. Šiame darbe $k = 975\ 001$, nes bangų numerių diapazonas prasideda $2\ 500\ \text{cm}^{-1}$ ir baigiasi $100\ 000\ \text{cm}^{-1}$, o žingsnio dydis yra $0,1\ \text{cm}^{-1}$. Funkcijos programinis kodas pateiktas 15-ame priede.

2.2.4. Saulės sistemos kūną pasiekiančios energinės apšvietos spektrinė analizė

Saulės spinduliuotės spektrinė energinė apšvieta yra aprašoma remiantis Planko (angl. *Planck*) juodojo kūno spinduliuotės dėsnio (1.1), kurio matematinė išraiška pakartota žemiau, laikant, kad Saulės temperatūra yra 5 772 kelvinai. Paminėtina, kad (1.1) lygtimi apskaičiuota reikšmė atitinka energijos kiekį, kurį išspinduliuoja vienas kvadratinis metras Saulės paviršiaus, tačiau vertė, pasiekianti tokį patį jos sistemos kūno paviršiaus plotą, apskaičiuojama gautą vertę padauginus iš santykio R_S^2/l^2 , kur R_S yra Saulės spindulys, o l – nuotolis nuo Saulės. Šio teiginio matematinis pagrindimas pateiktas 1.1.1. punkte.

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (1.1)$$

Čia: $I(\lambda, T)$ – juodojo kūno spektrinė energinė apšvieta, $\text{W} \cdot \text{nm}/\text{m}^2$;

λ – elektromagnetinės bangos ilgis, m;

T – juodojo kūno temperatūra, K;

c – šviesos greitis vakuume. $c = 299\ 792\ 458\ \text{m/s}$;

h – Planko konstanta. $h = 6,626\ 070\ 041 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$;

k – Bolcmano konstanta. $k = 1,380\ 650\ 424 \cdot 10^{-23}\ \text{J/K}$.

Norint apskaičiuoti juodojo kūno energinės apšvietos vertę tam tikrame bangos ilgių diapazone $\lambda \in [\lambda_1; \lambda_2]$, (1.1) formulė turi būti integruojama apibrėžtiniu integralu tarp taškų λ_1 ir λ_2 (2.11).

$$j(\lambda_1, \lambda_2, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda, T) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda \quad (2.11)$$

Čia: $j(\lambda_1, \lambda_2, T)$ – juodojo kūno energinė apšvieta $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$ bangų ilgių diapazone, W/m^2 .

Remiantis [4] literatūros šaltiniu, (2.6) lygtis gali būti pakeista (2.12) išraiška.

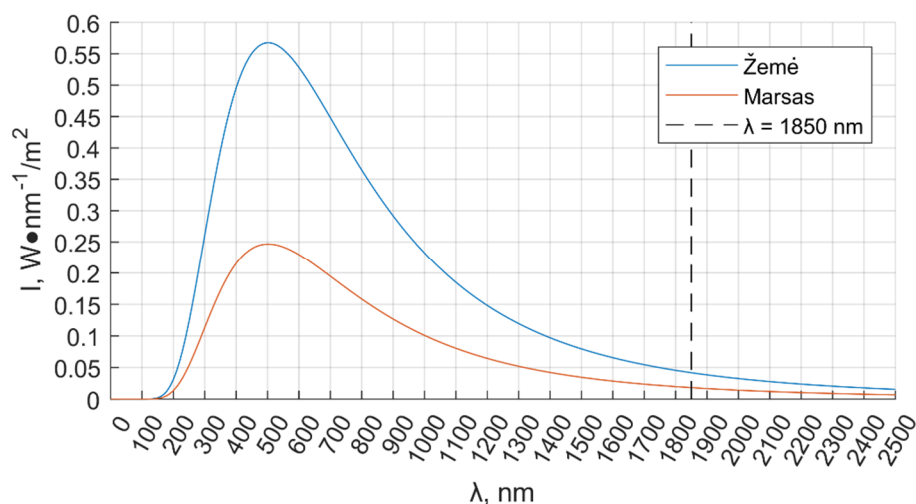
$$j(x_1, x_2, T) = \frac{2\pi k^4 T^4}{c^2 h^3} \int_{x_1}^{x_2} \frac{x^3}{e^x - 1} dx \quad (2.12)$$

Čia: x – bedimensis keitinys. $x = hc/(\lambda kT)$.

Matematinė (2.12) lygtyje esančio integralo išraiška, deja, negali būti surasta net galingomis matematinio modeliavimo platformomis, todėl rezultatas turi būti apskaičiuojamas skaitiniu integravimo metodu. Įrodoma, kad $x \in [0; +\infty)$ atveju apibrėžtinis integralas yra lygus $\pi^4/15$, o tada j išraiška aprašoma Stefano-Bolcmano dėsnio (1.2). Tolesnei analizei vykdyti „MATLAB“ programavimo aplinkoje sudaromos funkcijos $Planck(ld, T)$ ir $BBR(ld1, ld2, T)$, kurios atitinkamai aprašo juodojo kūno spektrinę energinę apšvietą bei juodo kūno energinę apšvietą nurodytame bangų ilgių diapazone. Kintamieji ld , $ld1$ ir $ld2$ atitinkamai reiškia λ , λ_1 ir λ_2 , matuojamus nanometrais, o T – juodojo kūno temperatūrą. Funkcijų programiniai kodai pateikti 16-ame ir 17-ame prieduose.

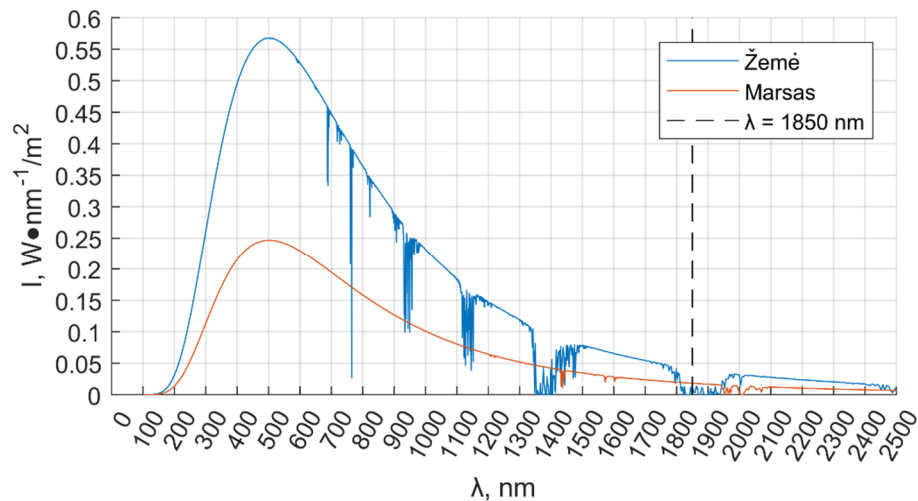
Sudarytąja $BBR()$ funkcija, 5 772 K temperatūros kūno spektrinę energinę apšvietą integruojant visame bangos ilgių diapazone ir rezultatą padauginant iš Saulės paviršiaus ploto, gaunamas Saulės šviesio dydis – $3,828 \cdot 10^{26}$ W. Žemę bei kitus Saulės sistemos kūnus pasiekiančios energinės apšvietos vertės apskaičiuojamos (1.4) lygtimi, kuri jau buvo pritaikyta 2.1.1. punkte.

2.14 paveikslas iliustruoja Saulės, kaip 5 772 K juodojo kūno, spektrinę energinę apšvietą, pasiekiančią Žemės bei Marso planetų atmosferas. Mažesnio bangos ilgio šviesa perneša didesnę energijos kiekį, todėl nenuostabu, kad energiją išgauti efektyviausia tik iki tam tikros ribos. Plačiausiai kosminėje pramonėje naudojamais fotovoltiniais elementais galima sugerti fotonus, kurių energija yra didesnė nei 0,67 elektronvoltai. Tai atitinka elektromagnetinių bangų ilgį iki $\lambda = 1,85 \mu\text{m}$ [44]. Naudojant $BBR()$ funkciją, apskaičiuojamas dalinis Saulės šviesis $\lambda = [0; 1850]$ nm bangų ilgių diapazone. Jis lygus ${}^{1850}_0L_{\odot} = 3,5475 \cdot 10^{26} \text{ W}$ arba 92,672% pilnojo šviesio vertės. Tame pačiame bangų intervale Žemės bei Marso atmosferas pasiekia atitinkamai $1\,261,7 \text{ W/m}^2$ ir $548,20 \text{ W/m}^2$ energinės apšvietos. Šie dydžiai yra atitinkamai $99,8 \text{ W/m}^2$ ir $43,3 \text{ W/m}^2$ mažesni už viso spektro energinę apšvietą.



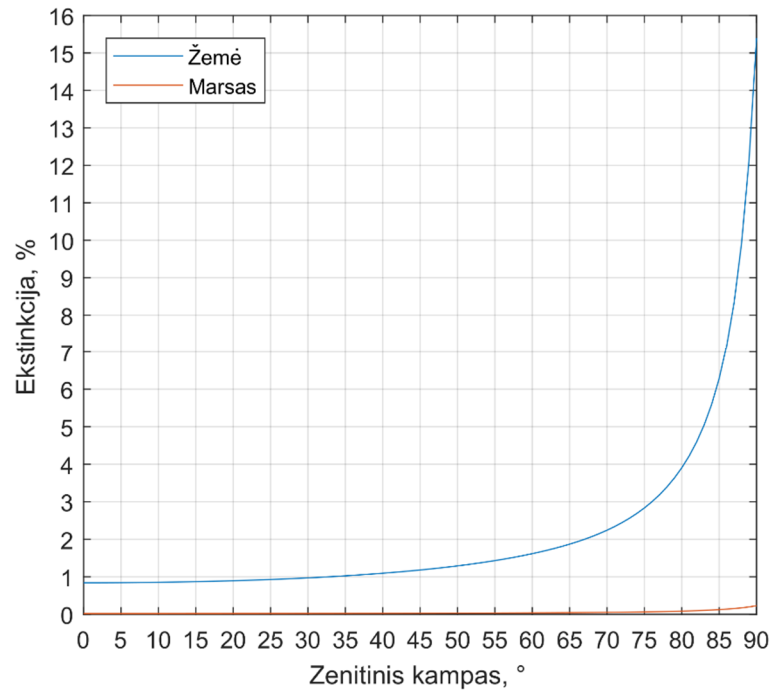
2.14 pav. Saulės spektrinė energinė apšvietą, pasiekianti Žemės ir Marso planetų atmosferas

Brėžiant grafiką galima pritaikyti optinio pralaidumo, kuris laipsniškai priklauso nuo optinio gylio, parametą. Tokiu atveju kreivėse matoma, kad tam tikrų bangos ilgių spinduliai atmosferoje yra sugeriami arba išsklaidomi. Atmosferinės ekstinkcijos įtaka Žemės bei Marso paviršius pasiekiančiai Saulės spektrinei energinei apšvietai pavaizduota 2.15 grafike.



2.15 pav. Saulės spektrinė energinė apšvieta, stačiu kampu kirtusi Žemės ir Marso planetų atmosferas

Iš 2.15 grafiko matoma, kad Marso atmosferos įtaka ją kertančiai šviesai yra nedidelė. Vis dėlto nenuostabu, kadangi Marso atmosferos tankis yra apytiksliai 81,69 mažesnis nei Žemės, todėl šviesą sugeria (išsklaido) mažesnis kiekis medžiagos. Skaičiuojant energinės apšvietos dydį $\lambda \in (0; 1850]$ nm bangų ilgių diapazone planetų paviršiuje, Žemei ji lygi $1\,251,2\text{ W/m}^2$, o Marsui – $548,08\text{ W/m}^2$. Vadinasi, Žemės ir Marso atmosferos sugeria (išsklaido) atitinkamai 0,84% ir 0,02% visos jas zenito kryptimi (statmenai paviršiui) pasiekiančios saulės šviesos energijos. Jei Saulę stebėtoją pasiekia horizonto kryptimi, Žemės paviršių pasiekia tik 84,70% energinės apšvietos. Marso planetoje šis santykis mažesnis ir lygus 99,46%. 2.16 grafike pateiktas atmosferinės ekstinkcijos santykio priklausomybė nuo zenitinio kampo.



2.16 pav. Atmosferinės ekstinkcijos priklausomybės nuo zenitinio kampo Žemės ir Marso planetose $100 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1850 \text{ nm}$ elektromagnetinių bangų intervale

2.2.5. Poskyrio išvados

1. Saulės energinės apšvietos silpnėjimas spinduliams kertant atmosferą pagrįstas optinės (atmosferinės) ekstinkcijos reiškiniu. $\lambda \in (100; 1850] \text{ nm}$ elektromagnetinių bangų diapazone, kuriame veikia šiuolaikiniai tandeminiai fotovoltiniai elementai, 0,84% Žemės planetos paviršių stačiu kampu pasiekiančių spindulių energijos yra sugeriami arba išsklaidomi. Marso planetoje šis skaičius lygus 0,02%. Horizontalo kryptimi stebėtoją pasiekianti energinė apšvieta dėl atmosferinės ekstinkcijos yra 15,30% mažesnė Žemės planetoje ir 0,54% mažesnė Marso planetoje.

2.3. Radioizotopų energijos sistemų panaudojimas

2.3.1. Radioizotopų ir fotovoltinių energijos sistemų palyginimas

Daugiafunkčių radioizotopinių termoelektrinių generatorių (angl. *Multi-mission Radioisotope Thermoelectric Generator*, toliau – DRTG) galios-masės santykis yra 2,8 W/kg savo misijos pradžioje, tačiau dėl juose naudojamo plutonio-238 ($^{238}_{94}\text{Pu}$) branduolių dalijimosi, po 14 metų šis skaičius nukrenta iki 2,2 W/kg arba 100 vatų 45 kilogramams (tiek sveria visas DRTG) [55]. Matematinė natūraliojo branduolių skilimo išraiška pateikta (2.13) lygtyje.

$$N(t) = N_0 e^{-\kappa t} \quad (2.13)$$

Čia: $N(t)$ – nesuskilusių branduolių skaičius po laiko tarpo t ;
 N_0 – pirminis radioaktyviųjų branduolių skaičius;
 κ – statistinis natūraliojo skilimo koeficientas, metai^{-1} ;
 t – laiko tarpas, metais.

Šiluma, išsiskirianti branduolių skilimo metu yra tiesiogiai proporcinga skylančių branduolių skaičiui, o šis – nesuskilusių branduolių skaičiui. Be to, daugiafunkcio radioizotopų termoelektrinio generatoriaus galia tiesiogiai priklauso nuo išsiskyrusios šilumos kiekio, todėl (2.13) lygtis gali būti perrašyta DRTG elektrinės galios apskaičiavimui:

$$P(t) = P_0 e^{-\kappa t} \quad (2.14)$$

Čia: $P(t)$ – DRTG elektrinė galia po laiko tarpo t , W;
 P_0 – pirminė DRTG elektrinė galia, W.

Pirminė daugiafunkcio radioizotopų termoelektrinio generatoriaus galia paprastai lygi 125 W, todėl žinant, kad po 14 metų ji nukrenta iki 100 W, apskaičiuojamas statistinis natūraliojo skilimo koef. κ :

$$\kappa = -\frac{1}{t} \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) = -\frac{1}{14} \ln\left(\frac{100}{125}\right) = 0,015\ 939\ \text{metai}^{-1}$$

Kosminėje erdvėje skriejančio zondo fotovoltiniai elementai dėl radiacijos poveikio degraduoja vidutiniškai 0,25% per metus [57]. Šiuo metu didžiausiu atstumu nuo Saulės esantis dirbtinis palydovas Junona (angl. *Juno*), elektros energijos gamybai naudojantis šviesą, yra Jupiterio orbitoje. Iki savo tikslo šis kosminis zondas skriejo 4-erius metus ir 11-ika mėnesių, o jo fotovoltinės sistemos galia jam įskriejus į orbitą aplink Jupiterį buvo lygi 486 W [56]. (2.14) lygtį pritaikant fotovoltinėms sistemoms, randama natūraliosios fotovoltinių sistemų degradacijos dėl radiacijos poveikio išraiška:

$$P(t) = P_0 e^{-\psi t} \quad (2.15)$$

Čia: $P(t)$ – fotovoltinės sistemos elektrinė galia po laiko tarpo t , W;
 P_0 – pirminė fotovoltinės sistemos elektrinė galia, W;
 ψ – fotovoltinių elementų natūraliojo degradavimo koeficientas, metai^{-1} ;

t – laiko tarpas, metais.

Remiantis gautąja formule ir anksčiau pateiktais duomenimis, apskaičiuojamas Junonos saulės elementų natūraliojo degradavimo koeficientas ψ :

$$\psi = -\frac{1}{t} \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) = -\frac{1}{4,9167} \ln\left(\frac{486}{486/1,0025^{4,9167}}\right) = 0,002496 \text{ metai}^{-1}$$

Iš gautojo rezultato matytina, kad fotovoltinių energijos sistemų maksimali galia krenta lėčiau, nei radioizotopų energijos sistemų.

Fotovoltinių elementų (sistemų) generuojama galia yra atvirkščiai proporcinga jų atstumo nuo Saulės kvadratui bei tiesiogiai proporcinga jų plotui:

$$P_0 = jS = \frac{L_{\odot}}{4\pi} \eta \cdot \frac{S}{l^2} \quad (2.16)$$

Čia: P_0 – fotovoltinės sistemos elektrinė galia, W;

S – fotovoltinės sistemos plotas, m²;

j – fotovoltinius elementus pasiekianti Saulės energinė apšvieta, W/m²;

L_{\odot} – Saulės šviesis. $L_{\odot} = 6,828 \cdot 10^{26}$ W;

η – fotovoltinių elementų efektyvumas;

l – nuotolis nuo Saulės, m.

Junonos 72 m² ploto fotovoltinės sistemos masė yra 340 kg. Neveikiama saulės radiacijos ji Jupiterio, nuo Saulės vidutiniškai nutolusio per $7,7738 \cdot 10^{11}$ metrų, orbitoje tiekų 492 W galią. Remiantis šiais duomenimis apskaičiuojamas šio kosminio aparato saulės elementų efektyvumas:

$$\eta = \frac{4\pi l^2 P_0}{L_{\odot} S} = \frac{4\pi \cdot (7,7738 \cdot 10^{11})^2 \cdot 492}{72 \cdot 3,828 \cdot 10^{26}} = 13,556\%$$

Taikant (2.15) ir (2.16) lygtis bei remiantis duotais ir apskaičiuotais duomenimis, užrašomos bendroji (2.17) bei Junonos kosminiame aparate įrengtos fotovoltinės sistemos elektrinės galios (2.18) išraiškos.

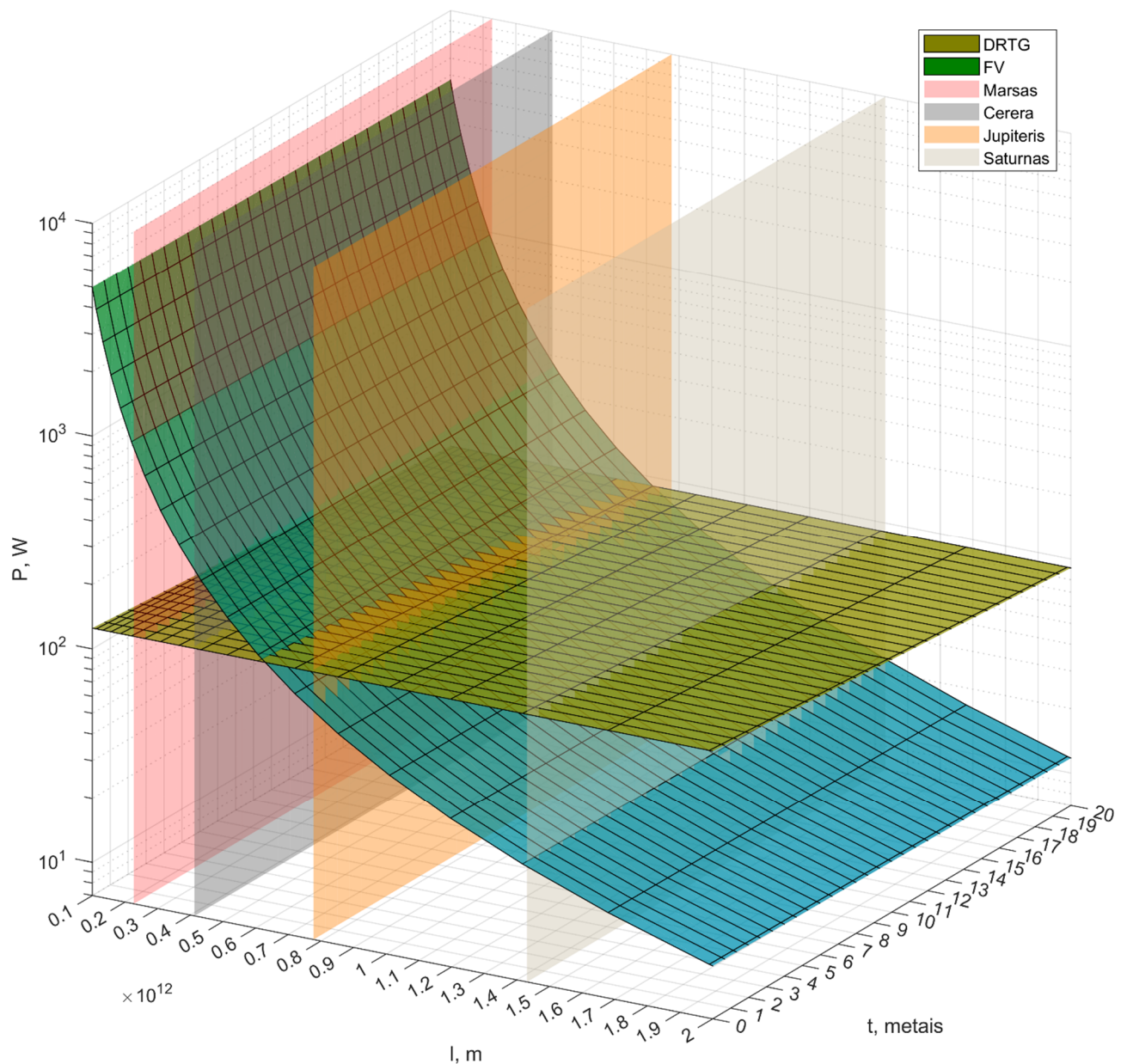
$$P(t, S, l) = P_0 e^{-\psi t} = \frac{L_{\odot}}{4\pi} \eta \cdot \frac{S}{l^2} e^{-\psi t} \quad (2.17)$$

$$P(t, S, l) = 4,1295 \cdot 10^{24} \frac{S}{l^2} e^{-0,002496t} \quad (2.18)$$

Turint radioizotopų ir fotovoltinių energijos sistemų galių išraiškas galimas jų palyginimas. Vienas 45 kilogramų masės daugiafunkcis radioizotopų termoelektrinis generatorius savo misijos pradžioje kuria 125 W galios. 45 kg masės fotovoltinė sistema yra apytiksliai 9,53 kvadratinių metrų ploto. Jų galios priklausomybės nuo laiko ir atstumo iki Saulės yra pateiktos lygtyse žemiau. 2.17 paveikslas šias priklausomybes iliustruoja grafiškai. Grafike taip pat iliustruojami vidutiniai Marso, Cereros, Jupiterio ir Saturno planetų nuotoliai nuo Saulės. Paminėtina, kad DRTG galia visiškai nepriklauso nuo atstumo iki Saulės ar aplinkos parametrų.

$$P_{DRTG}(t) = 125 e^{-0,015939t} \quad (2.19)$$

$$P_{FV}(t, l) = 3,935 \cdot 10^{25} \frac{e^{-0,002496t}}{l^2} \quad (2.20)$$



2.17 pav. Daugiafunkcio radioizotopų generatoriaus ir fotovoltinių baterijų priklausomybės nuo jų misijos laiko ir aparato nuotolio iki Saulės bei vidutiniai Marso, Cereros, Jupiterio ir Saturno nuotoliai iki Saulės

Iš grafiko matytina, kad daugiafunkcis radioizotopų generatorius fotovoltines baterijas galia pralenkia tik maždaug Jupiterio nuotoliu nuo Saulės. Susikirtimo vieta randama sulyginus (2.19) ir (2.20) lygtis. (2.17) grafiko atveju tai kreivė lygtimi $l = 5,611 \cdot 10^{11} e^{0,006722t}$.

Misijos laiko trukmė pasirinkimui tarp radioizotopų ir fotovoltinių energijos sistemų beveik neturi. Vis dėlto yra tokių veiksnių, kurie šiame darbe nėra analizuojami, tačiau projektuojant kosminį aparatą yra svarbūs. Keletas tokių: kaina (RES yra brangesnė nei FVES), aplinkos sąlygos (FVES veikia tik saulės šviesoje, o RES – nuolat) ar reguliavimai (branduolinių medžiagų paleidimas į kosmoso erdvę yra griežtai reguliuojamas).

2.3.2. Poskyrio išvados

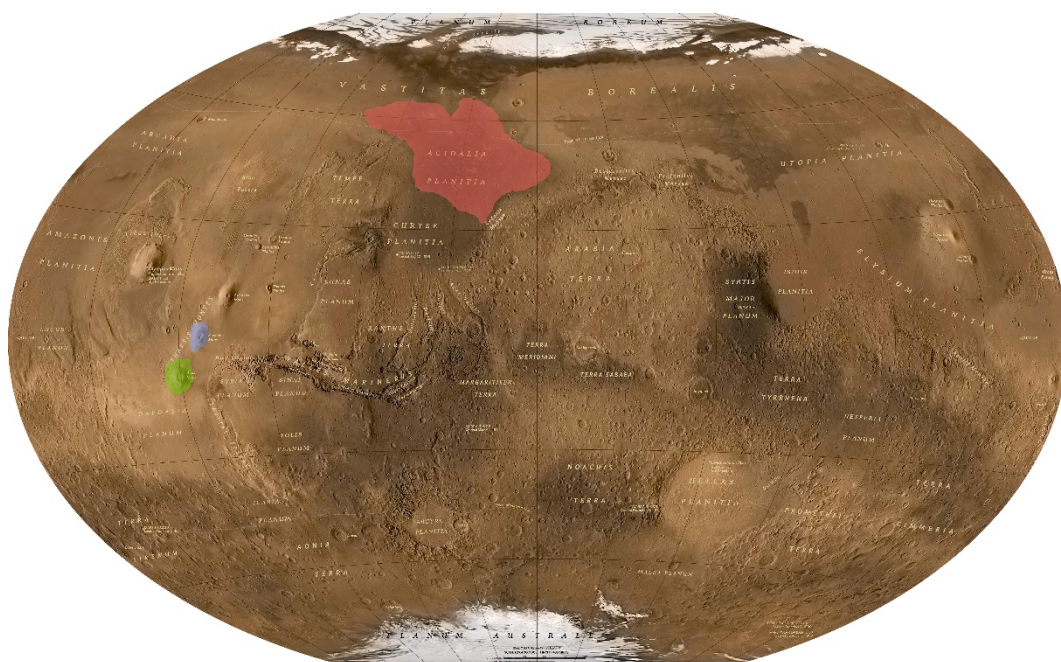
1. Radioizotopų energijos sistemomis gaminamos elektros energijos dydis nepriklauso nuo aparato atstumo iki Saulės ar aplinkos veiksnių, tačiau kosminis aparatas arba jo radioizotopų termoelektrinis generatorius turi būti projektuojamas atsižvelgiant į tai, kad RTG galia bėgant laikui krenta apytiksliai 1,6% per metus. Misijos trukmės įtaka pasirinkimui tarp fotovoltinių ir radioizotopų energijos sistemų yra nedidelė. Kur kas didesnę įtaką turi kosminio zondo, kuriame viena iš šių sistemų yra naudojama, nuotolis iki Saulės. Septynių metų trukmės misijai šis atstumas yra lygus $5,881 \cdot 10^8$ km, atitinkantis 3,932 astronominius vienetus. Tai yra toliau nei Cerera, bet arčiau nei Jupiteris.

2.4. Elektros energijos gamyba Marso planetoje

2.4.1. Elektros energijos gamyba strateginiuose Marso planetos taškuose

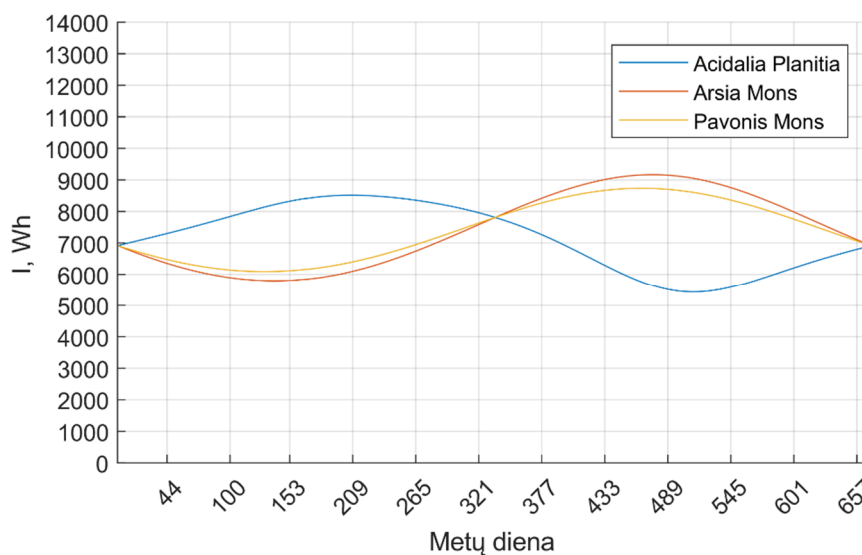
Tiek Nacionalinė Aeronautikos ir kosmoso administracija (angl. *National Aeronautics and Space Administration*, NASA) tiek inovacijų genijaus Elono Musko (angl. *Elon Musk*) įsteigta privati Kosmoso tyrinėjimo technologijų korporacija (angl. *Space Exploration Technologies Corporation*, SpaceX) iki sekančio dešimtmečio pabaigos grupę žmonių planuoja išlaipinti raudonosios planetos paviršiuje. Viena potencialių nusileidimo aikštelių yra *Acidalia Planitia* lyguma esanti $\phi = 49,8^\circ\text{N}$ geografinėje platumoje ir $\lambda = 339,3^\circ\text{E}$ geografinėje ilgumoje (žr. 2.18 pav.) Be pastarosios dar siūlomas vienas šalia kito esantys *Arsia Mons* (8.35°S 120.09°W) bei *Pavonis Mons* (1.48°N 247.04°E) vulkanai (žr. 2.18 pav.) Marso naujieji metai pradunami skaičiuoti nuo jo tranzito per pavasario lygiadienio tašką, todėl šiame darbe taikomas orbitinis kūno kampas α turi būti papildytas $\alpha_{SE} = -90^\circ - \alpha_0 = -71^\circ$ dėmeniu. Neatsižvelgiant į atmosferos įtaką saulės šviesai ir laikant, kad spinduliai į 1 m^2 ploto fotovoltinę sistemą krenta stačiu kampu, analizuojamoms vietoms apskaičiuojamas minimalus ir maksimalus per Marso parą išgautinas bei suminis vienerių metų energijos kiekis:

Vieta	Metinis E, kWh	Minimalus E, Wh	Maksimalus E, Wh
Acidalia Planitia	4795.6	5428.8 (511 diena)	8514.8 (207 diena)
Arsia Mons	4968.2	5795.4 (139 diena)	9166.2 (475 diena)
Pavonis Mons	4946.7	6091.0 (130 diena)	8735.4 (465 diena)

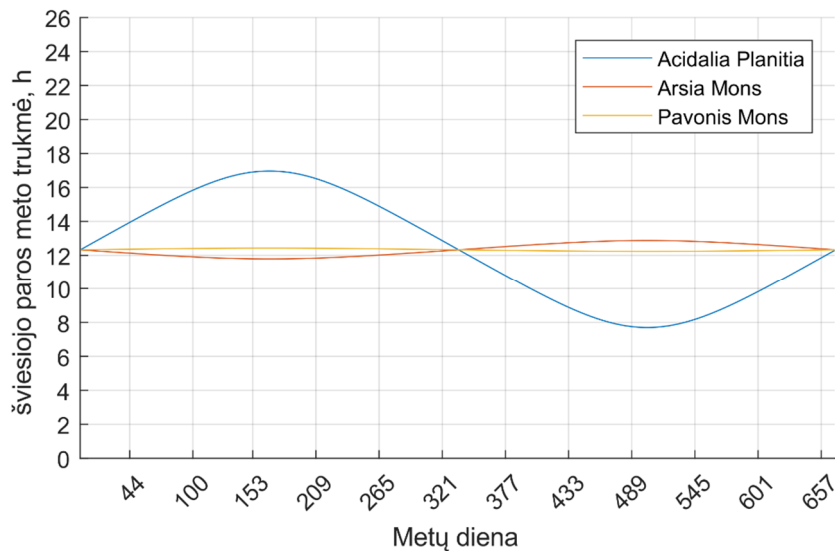


2.18 pav. *Acidalia Planitia* lyguma (rausva spalva) ir *Arsia Mons* (šviesiai žalia spalva) bei *Pavonis Mons* (šviesiai mėlyna spalva) vulkanai Marso planetoje

(2.19) ir (2.20) paveikslai atitinkamai iliustruoja per vieną parą 1 m^2 ploto fotovoltine sistema išgautiną energijos kiekį bei šviesiojo paros meto trukmę. Grafikų abscisių ašis suskirstyta į 12 dalių, atitinkančių Marso mėnesių trukmės.



2.19 pav. 1 m^2 ploto fotovoltine sistema per vieną Marso parą išgautinas energijos kiekis tam tikrose Marso planetos vietose



2.20 pav. Šviesiojo paros meto trukmė tam tikrose Marso planetos vietose

Iš (2.19) ir (2.20) grafikų matytina, kad arti pusiaujo esančių vulkanų vietose dienos trukmė svyruoja nedaug, tačiau fotovoltinėmis baterijomis išgautina energija gali skirtis daugiau nei 30%. Taip yra todėl, kad skirtingu metų laiku Marsas yra skirtingu atstumu nuo Saulės, o planetą pasiekianti energinė apšvieta yra atvirkščiai proporcinga šio atstumo kvadratui.

2.4.2. Poskyrio išvados

1. Šiuo metu trys žmonių išlaipinimui ir tyrimų stočių įrengimui tinkamiausios Marso paviršiaus vietos yra *Acidalia Planitia* lyguma bei *Arsia Mons* ir *Pavonis Mons* vulkanai. Šviesiojo paros meto trukmė minėtoje lygumoje svyruoja tarp 7 h 41 min 51 s ir 16 h 57 min 56 s, tačiau arti pusiaujo esančių vulkanų zonose šis skirtumas nėra didesnis nei 1 valanda ir 6 minutės. Mažiausias ir didžiausias *Acidalia Planitia* lygumą bei *Arsia Mons* ir *Pavonis Mons* vulkanų zonas pasiekiantis šviesos energijos tankis yra atitinkamai lygūs $5\,428,8\text{ Wh/m}^2$ ir $8\,514,8\text{ Wh/m}^2$, $5\,795,4\text{ Wh/m}^2$ ir $9\,166,2\text{ Wh/m}^2$ bei $6\,091,0\text{ Wh/m}^2$ ir $8\,735,4\text{ Wh/m}^2$. Metinis šias Marso vietas pasiekiantis saulės šviesos energijos tankis atitinkamai lygus $4\,795,6\text{ kWh/m}^2$, $4\,968,2\text{ kWh/m}^2$ ir $4\,946,7\text{ kWh/m}^2$.

IŠVADOS

Išnagrinėjus mokslinius straipsnius bei žinytus apie Saulės sistemos kūnų judėjimą, jų padėtį ir fizinius duomenis, remiantis spektrometrijos duomenų bazėmis, taip pat išvedus reikalingas matematinės formules bei sudarius kompiuterines programas, buvo atlikta energijos gamybos Saulės sistemos kūnų orbitose ir jų paviršiuje analizė bei sudarytos šios analizės išvados:

1.1. Vidutiniame Žemės planetos nuotolyje nuo Saulės energinė apšvieta yra lygi $1361,5 \text{ W/m}^2$, o vidutiniame Marso nuotolyje – $591,55 \text{ W/m}^2$. Vidutiniame Jupiterio nuotolyje šis dydis siekia tik $50,408 \text{ W/m}^2$. Arčiausiai bei toliausiai nuo Saulės esančių kūnų – Merkurijaus bei Eridės – vidutiniuose nuotoliuose juos pasiekia atitinkamai $9484,9 \text{ W/m}^2$ ir $0,36452 \text{ W/m}^2$ dydžio Saulės energinė apšvieta;

1.2. Žemės planetoje, dėl jos orbitos elipsiškumo, didžiausia ir mažiausia energinės apšvietos vertės skiriasi 6,7%, o Marse – 37,7%. Mažiausiai elipsiška orbita aplink Saulę skrieja Venera, o labiausiai – Eridė. Didžiausia ir mažiausia jas pasiekianti energinė apšvieta skiriasi atitinkamai 2,7% ir 216%;

2. Energijos kiekis, per vieną parą išgautinas tam tikrų Saulės sistemos kūnų paviršiuje, tiesiogiai priklauso nuo jų šviesiojo paros meto – dienos – trukmės. Pusiaujo zonoje diena visada trunka pusę paros. $\epsilon - 90^\circ < \phi < 90^\circ - \epsilon$ atveju dienos trukmė kinta nuo kūno padėties orbitoje. $\phi = \pm(90^\circ - \epsilon)$ atveju egzistuoja viena metų para, per kurią Saulė virš horizonto nepakyla (nenusileidžia), o dar labiau šiaurėje (pietuose) tokių parų skaičius didėja. Šiaurės ir pietų ašigaliuose vieneri metai trunka vieną naktį ir vieną dieną;

3. Žemės, Marso ir nykštukinėje Cereros planetose per vienerius jų metus energijos daugiausiai išgautina pietų pusrutulyje. Didžiausias ir mažiausias energijos kiekiai yra pasiekiami ašigalių taškuose. Lyginant Žemės, Marso ir Cereros šiaurės ašigaliuose per vienerius jų metus išgautiną energiją su vertėmis, apskaičiuotomis jų pusiaujo zonoms, šie santykiai atitinkamai lygūs: 97,86%, 88,74% ir 90,79%. Pietų ašigaliui jie atitinkamai lygūs: 101,6%, 111,0% ir 109,2%;

4. 404 kilometrų atstumu virš Žemės paviršiaus, kuriame skrieja Tarptautinė kosminė stotis, orbitinė naktis trunka 35 minutes ir 55 sekundes. Geosinchroninėje Žemės orbitoje orbitinė naktis trunka 67 min. ir 28 s, o Mėnulio atstumu – 164 minutes ir 33 sekundes. Marso areosinchroninėje orbitoje naktis trunka 25 min. ir 19 s., o jo palydovo Fobo atstumu – 20 minučių ir 17 sekundžių. Geosinchroninėje Veneros orbitoje skriejantis objektas į planetos šešėlį nepakliūva;

5. $\lambda \in (100; 1\ 850] \text{ nm}$ elektromagnetinių bangų diapazone, kuriame veikia šiuolaikiniai tandeminiai fotovoltiniai elementai, 0,84% Žemės planetos paviršių stačiu kampu pasiekiančių spindulių energijos yra sugeriami arba išsklaidomi. Marso planetoje šis skaičius lygus 0,02%.

Horizonto kryptimi stebėtoją pasiekianti energinė apšvieta yra 15,30% mažesnė Žemės planetoje ir 0,54% mažesnė Marse;

6. Radioizotopų energijos sistemų maksimali galia krenta apytiksliai 1,6% per metus, o fotovoltinių ES – 0,25%. Pasirinkimui tarp fotovoltinių ir radioizotopų energijos sistemų didžiausią įtaką turi kosminio zondo, kuriame viena iš šių sistemų turi būti naudojama, nuotolis iki Saulės. Septynių metų trukmės misijai šis atstumas yra lygus $5,881 \cdot 10^8$ km, atitinkantis 3,932 astronominius vienetus. Tai yra toliau nei Cereros (2,76 A. V.), bet mažiau nei Jupiterio (5,2 A. V.) vidutinis nuotolis nuo Saulės.

7. Mažiausias ir didžiausias Marso *Acidalia Planitia* lygumą bei *Arsia Mons* ir *Pavonis Mons* vulkanų zonas, kuriose planuojama įrengti pirmąsias apgyvendintas Marso tyrimų stotis, pasiekiantis šviesos energijos tankis yra atitinkamai lygūs $5\,428,8 \text{ Wh/m}^2$ ir $8\,514,8 \text{ Wh/m}^2$, $5\,795,4 \text{ Wh/m}^2$ ir $9\,166,2 \text{ Wh/m}^2$ bei $6\,091,0 \text{ Wh/m}^2$ ir $8\,735,4 \text{ Wh/m}^2$. Metinis šias Marso vietas pasiekiantis saulės šviesos energijos tankis atitinkamai lygus $4\,795,6 \text{ kWh/m}^2$, $4\,968,2 \text{ kWh/m}^2$ ir $4\,946,7 \text{ kWh/m}^2$.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. SOHO. *Our Star the Sun* [interaktyvus]. 1995-12-02 [žiūrėta 2017-02-15 d.].
Prieiga per: <https://sohowww.nascom.nasa.gov/classroom/classroom.html>
2. WIKIPEDIJA. *Saulė* [interaktyvus]. 2016-11-12 [žiūrėta 2017-02-15 d.].
Prieiga per: <https://lt.wikipedia.org/wiki/Saul%C4%97>
3. ASTM E490-00a(2014), Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014
4. WIKIPEDIJA. *Black-body radiation* [interaktyvus]. 2017-02-01 [žiūrėta 2017-02-15 d.].
Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Black-body_radiation
5. WIKIPEDIJA. *Black body* [interaktyvus]. 2017-02-05 [žiūrėta 2017-02-15 d.].
Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Black_body
6. WIKIPEDIJA. *Stefan–Boltzmann law* [interaktyvus]. 2017-01-24 [žiūrėta 2017-02-16 d.].
Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Stefan%E2%80%93Boltzmann_law
7. WIKIPEDIJA. *Electric energy consumption* [interaktyvus]. 2017-01-31 [žiūrėta 2017-02-16 d.]. Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_energy_consumption
8. WIKIPEDIJA. *Mercury (planet)* [interaktyvus]. 2017-03-02 [žiūrėta 2017-03-04 d.].
Prieiga per: [https://en.wikipedia.org/wiki/Mercury_\(planet\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Mercury_(planet))
9. WIKIPEDIJA. *Venus* [interaktyvus]. 2017-03-03 [žiūrėta 2017-03-04 d.].
Prieiga per: <https://en.wikipedia.org/wiki/Venus>
10. WIKIPEDIJA. *Earth* [interaktyvus]. 2017-03-03 [žiūrėta 2017-03-04 d.].
Prieiga per: <https://en.wikipedia.org/wiki/Earth>
11. GRAYZECK, Ed. *Mars Fact Sheet* [interaktyvus]. 2016-12-23 [žiūrėta 2017-03-04 d.].
Prieiga per: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html>
12. THE SKY LIVE. *Asteroid 4 Vesta* [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2017-03-05 d.].
Prieiga per: <https://theskylive.com/vesta-info>
13. WIKIPEDIJA. *Ceres (dwarf planet)* [interaktyvus]. 2017-03-03 [žiūrėta 2017-03-05 d.].
Prieiga per: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ceres_\(dwarf_planet\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Ceres_(dwarf_planet))
14. WIKIPEDIJA. *Jupiter* [interaktyvus]. 2017-02-25 [žiūrėta 2017-03-05 d.].
Prieiga per: <https://en.wikipedia.org/wiki/Jupiter>
15. WILLIAMS, David. Planetary Fact Sheet - Metric [interaktyvus]. 2016-12-09 [žiūrėta 2017-03-06 d.]. Prieiga per: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/index.html>
16. WIKIPEDIJA. *Eris (dwarf planet)* [interaktyvus]. 2017-02-12 [žiūrėta 2017-03-06 d.].
Prieiga per: [https://en.wikipedia.org/wiki/Eris_\(dwarf_planet\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Eris_(dwarf_planet))

17. WIKIPEDIA. *Mars* [interaktyvus]. 2017-02-22 [žiūrėta 2017-03-06 d.].
Prieiga per: <https://en.wikipedia.org/wiki/Mars>
18. NASA SCIENCE. *Interplanetary Seasons* [interaktyvus]. 2000-06-19 [žiūrėta 2017-03-09 d.]. Prieiga per: <https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2000/interplanetaryseasons>
19. EIGHT PLANETS FACTS. *MARS* [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-03-09 d.].
Prieiga per: <http://www.eightplanetsfacts.com/mars.php>
20. THE SKY LIVE. *Dwarf Planet 1 Ceres* [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2017-03-09 d.].
Prieiga per: <https://theskylive.com/ceres-info>
21. BOURKE, Paul. *Circles and spheres* [interaktyvus]. 1992-04 [žiūrėta 2017-03-20 d.].
Prieiga per: <http://paulbourke.net/geometry/circlesphere/>
22. VIKIPEDIJA. *Azimutas* [interaktyvus]. 2017-01-23 [žiūrėta 2017-03-22 d.].
Prieiga per: <https://lt.wikipedia.org/wiki/Azimutas>
23. VIKIPEDIJA. *Zenitas* [interaktyvus]. 2014-01-25 [žiūrėta 2016-09-04 d.].
Prieiga per: <https://lt.wikipedia.org/wiki/Zenitas>
24. TIME AND DATE AS. *Perihelion, Aphelion and the Solstices* [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2017-03-25 d.].
Prieiga per: <https://www.timeanddate.com/astronomy/perihelion-aphelion-solstice.html>
25. TIME AND DATE AS. *Solstices & Equinoxes* [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2017-03-25 d.].
Prieiga per: <https://www.timeanddate.com/calendar/seasons.html>
26. WIKIPEDIA. *Orbital speed* [interaktyvus]. 2017-02-28 [žiūrėta 2017-04-16 d.].
Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Orbital_speed
27. WIKIPEDIA. *Air mass (astronomy)* [interaktyvus]. 2016-12-26 [žiūrėta 2017-01-01 d.].
Prieiga per: [https://en.wikipedia.org/wiki/Air_mass_\(astronomy\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Air_mass_(astronomy))
28. VIKIPEDIJA. *Ekstinkcija* [interaktyvus]. 2013-03-12 [žiūrėta 2017-01-04 d.].
Prieiga per: <https://lt.wikipedia.org/wiki/Ekstinkcija>
29. WIKIPEDIA. *Beer–Lambert law* [interaktyvus]. 2016-12-30 [žiūrėta 2017-01-01 d.].
Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Beer%E2%80%93Lambert_law
30. VIKIPEDIJA. *Avogadro konstanta* [interaktyvus]. 2016-05-09 [žiūrėta 2017-01-02 d.].
Prieiga per: https://lt.wikipedia.org/wiki/Avogadro_konstanta
31. VIKIPEDIJA. *Šviesos sugertis* [interaktyvus]. 2013-03-09 [žiūrėta 2017-01-02 d.].
Prieiga per: https://lt.wikipedia.org/wiki/%C5%A0viesos_sugertis
32. WIKIPEDIA. *Barometric formula* [interaktyvus]. 2016-11-27 [žiūrėta 2017-01-08 d.].
Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Barometric_formula
33. WIKIPEDIA. *Density of air* [interaktyvus]. 2017-01-03 [žiūrėta 2017-01-08 d.].
Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Density_of_air

34. WIKIPEDIA. *International Standard Atmosphere* [interaktyvus]. 2016-09-16 [žiūrėta 2017-01-12 d.]. Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/International_Standard_Atmosphere
35. PEDIAA. Difference between concentration and density [interaktyvus]. 2015-09-13 [žiūrėta 2017-01-09 d.]. Prieiga per: <http://pediaa.com/difference-between-concentration-and-density/>
36. CURRY, Judith A. *PLANETARY ATMOSPHERES* [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-01-14 d.]. Prieiga per: <http://curry.eas.gatech.edu/Courses/6140/p-atmos.html>
37. WIKIPEDIA. *Atmosphere of Mars* [interaktyvus]. 2017-01-09 [žiūrėta 2017-01-14 d.]. Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Mars
38. WIKIPEDIA. *Solar cell* [interaktyvus]. 2017-01-04 [žiūrėta 2017-01-20 d.]. Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell
39. WIKIPEDIA. *Photovoltaic effect* [interaktyvus]. 2017-01-14 [žiūrėta 2017-01-20 d.]. Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic_effect
40. ALDOUS, Scott; YEWDALL, Zeke; LEY, Sam.. *A Peek Inside a PV Cell* [interaktyvus]. 2017-11 [žiūrėta 2017-01-20 d.]. Prieiga per: <http://www.homepower.com/articles/solar-electricity/equipment-products/peek-inside-pv-cell>
41. Marius B. *Elektros srovė puslaidininkuose* [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-01-20 d.]. Prieiga per: http://ik.su.lt/~mariusbm/Elektra/teorija/elektros_srove_puslaidininkuose.html
42. HOME POWER. *Solar Electricity Basics* [interaktyvus]. 2012 [žiūrėta 2017-01-21 d.]. Prieiga per: <http://www.homepower.com/articles/solar-electricity/basics/what-solar-electricity>
43. WIKIPEDIA. *Solar panels on spacecraft* [interaktyvus]. 2016-03-24 [žiūrėta 2016-04-21 d.]. Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_panels_on_spacecraft
44. WIKIPEDIA. *Multi-junction solar cell* [interaktyvus]. 2016-09-13 [žiūrėta 2016-09-15 d.]. Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-junction_solar_cell
45. KIELA, Karolis. FOTOVOLTINIAI ELEMENTAI. *Mokslas – Lietuvos ateitis*. 2011, pp. 56-62 ISSN 2029-2341
46. WIKIPEDIA. *Vanguard 1* [interaktyvus]. 2016-04-14 [žiūrėta 2016-04-24 d.]. Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Vanguard_1
47. WIKIPEDIA. *Sputnik 1* [interaktyvus]. 2016-04-22 [žiūrėta 2016-04-24 d.]. Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Sputnik_1
48. ZAK, Anatoly. *Sputnik-2 in orbit* [interaktyvus]. 2013-09-18 [žiūrėta 2016-04-24 d.]. Prieiga per: http://www.russianspaceweb.com/sputnik2_mission.html
49. WIKIPEDIA. *Explorer 1* [interaktyvus]. 2016-04-10 [žiūrėta 2016-04-24 d.]. Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Explorer_1
50. NASA. RADIOISOTOPE POWER SYSTEMS. *What is Radioisotope Power and why does NASA use it?* [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2016-04-18 d.].

- Prieiga per: <https://solarsystem.nasa.gov/rps/overview.cfm>
51. NASA. RADIOISOTOPE POWER SYSTEMS. *Introduction* [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2016-04-18 d.]. Prieiga per: <https://solarsystem.nasa.gov/rps/home.cfm>
52. NASA. RADIOISOTOPE POWER SYSTEMS. *From a source of heat comes power to explore* [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2016-04-17 d.].
Prieiga per: <https://solarsystem.nasa.gov/rps/types.cfm>
53. NASA. RADIOISOTOPE POWER SYSTEMS. *A legacy of exploration* [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2016-04-19 d.]. Prieiga per: <http://solarsystem.nasa.gov/rps/rtg.cfm>
54. WIKIPEDIA. *Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator* [interaktyvus]. 2015-11-19 [žiūrėta 2016-04-19 d.].
Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-Mission_Radioisotope_Thermoelectric_Generator
55. WIKIPEDIA. *Radioisotope thermoelectric generator* [interaktyvus]. 2016-04-14 [žiūrėta 2016-04-18 d.]. Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope_thermoelectric_generator
56. WIKIPEDIA. *Juno (spacecraft)* [interaktyvus]. 2017-05-01 [žiūrėta 2017-05-04 d.].
Prieiga per: [https://en.wikipedia.org/wiki/Juno_\(spacecraft\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Juno_(spacecraft))
57. WIKIPEDIA. *Space-based solar power* [interaktyvus]. 2016-02-23 [žiūrėta 2016-04-18 d.].
Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Space-based_solar_power
58. PCISYS. How to Calculate Absorption Coefficient (or Absorbance) from HITRAN Data [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-05-17 d.].
Prieiga per: <http://home.pcisys.net/~bestwork.1/CalcAbs/CalcAbsHitran.html>
59. SPACE EXPLORATION BETA. *Geosynchronous orbits around other Solar System objects* [interaktyvus]. 2014-10-01 [žiūrėta 2017-04-29 d.]. Prieiga per: <https://space.stackexchange.com/questions/5484/geosynchronous-orbits-around-other-solar-system-objects>
60. WIKIPEDIA. *Atmosphere of Earth* [interaktyvus]. 2017-04-21 [žiūrėta 2017-05-15 d.].
Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Earth
61. EUREMS. *PV Cells* [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-09-15 d.].
Prieiga per: <http://www.eurems.com/links-topics/technical-info/cells>

PRIEDAI

Priedas 1. Aplink Saulę skriejančio kūno nuotolio iki jos centro funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje

```
function r = DtS(a,SSB)
% Rezultatai:   r   - atstumas iki Saulės, metrais.
% Kintamieji:  a   - orbitinis kampas nuo afelio taško, laipsniais;
%              SSB - Saulės sistemos kūnas:
%              'Me' - Merkurijus;
%              'Ve' - Venera;
%              'Z'  - Žemė;
%              'Ma' - Marsas;
%              'Vst' - Vesta;
%              'C'  - Cerera;
%              'J'  - Jupiteris;
%              'S'  - Saturnas;
%              'U'  - Uranas;
%              'N'  - Neptūnas;
%              'P'  - Plutonas;
%              'E'  - Eridė.
%              Bet kokia kita reikšmė gražina Saulės spindulį!
% Programa:
switch SSB
case 'Me'
    rp = 46.001e+9; ra = 69.817e+9;
case 'Ve'
    rp = 107.48e+9; ra = 108.94e+9;
case 'Z'
    rp = 147.10e+9; ra = 152.10e+9;
case 'Ma'
    rp = 206.62e+9; ra = 249.23e+9;
case 'Vst'
    rp = 321.79e+9; ra = 384.72e+9;
case 'C'
    rp = 382.62e+9; ra = 445.41e+9;
case 'J'
    rp = 740.55e+9; ra = 816.04e+9;
case 'S'
    rp = 1352.6e+9; ra = 1514.5e+9;
case 'U'
    rp = 2341.3e+9; ra = 3003.6e+9;
case 'N'
    rp = 4444.5e+9; ra = 4545.7e+9;
case 'P'
    rp = 4436.8e+9; ra = 7375.9e+9;
case 'E'
    rp = 5723.0e+9; ra = 14602e+9;
otherwise
    rp = 695.70e+6; ra = 695.70e+6;
end
A=(ra+rp)/2;
e=(ra-rp)/(ra+rp);
r=(A*(1-e^2))/(1-e*cosd(a));
end
```

Priedas 2. Saulės kampo virš horizonto funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje

```
function h = SunEA(l,R,B,phi,eps,a,a0,TdSi)
% Rezultatai:  h    - Saulės aukštis virš horizonto, laipsniais.
% Kintamieji:  l    - atstumas iki Saulės centro, metrais;
%              R    - kūno spindulys, metrais;
%              phi  - stebėtojo geografinė platuma, laipsniais;
%              eps  - kūno sukimosi ašies posvyris į orbitos ašį, laips.;
%              a    - orbitinis kampas, laipsniais;
%              a0   - kampas tarp afelio ir saulėgrįžos taškų, laips.;
%              TdSi - vienerių metų trukmė siderinėmis paromis.
% Programa:
angle = a+a0+B/TdSi;
koef  = cosd(phi)*cosd(eps)*cosd(B)*cosd(angle)+...
       cosd(phi)*sind(B)*sind(angle)+sind(phi)*sind(eps)*cosd(angle);
h     = asind((l*koef-R)/sqrt(R^2 - 2*l*R*koef + l^2));
end
```

Priedas 3. Taškų, kuriuose Saulė kerta horizontą, apskaičiavimo funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje

```
function [dawn dusk adawn adusk] = Findh0(phi,a,SSB)
% Rezultatai:   dawn   - aušros rotacinis kampas, laipsniais;
%              dusk   - saulėlydžio rotacinis kampas, laipsniais;
%              adawn  - aušros orbitinis kampas, laipsniais;
%              adusk  - saulėlydžio orbitinis kampas, laipsniais.
% Kintamieji:  phi    - stebėtojo geografinė platuma, laipsniais;
%              a      - orbitinis kampas nuo afelio taško, laipsniais;
%              SSB    - Saulės sistemos kūnas:
%                  'Me' - Merkurijus;
%                  'Z'  - Žemė;
%                  'Ma' - Marsas;
%                  'C'  - Cerera.
%              Bet kokia kita SSB reikšmė gražina nulinį rezultatą!
% Programa:
dawn = 0; dusk = 0; adawn = a; adusk = a;
switch SSB
case 'Me'
    R = 2439700;    TdSi = 1.5000; eps = 0;    a0 = 0;
case 'Z'
    R = 6371000;    TdSi = 366.27; eps = 23.44; a0 = 12.476;
case 'Ma'
    R = 3389500;    TdSi = 669.59; eps = 25.19; a0 = -19;
case 'C'
    R = 473000;    TdSi = 4447.6; eps = 10.59; a0 = -17.186;
otherwise
    return
end
FCN = @(B)SunEA(DtS(a+B/TdSi,SSB),R,B,phi,eps,a,a0,TdSi);
FCNi = @(B)SunEA(DtS(a+B/TdSi,SSB),R,B,phi,eps,a,a0,TdSi)*(-1);
if FCN(fminbnd(FCN,0,360))>0
    dawn = 0; dusk = 360;
elseif FCN(fminbnd(FCNi,0,360))<=0
    dawn = 0; dusk = 0;
else
    point = fminbnd(FCNi,0,360);
    if FCN(point-180)>0 && FCN(point+180)>0
        if point<180
            dawn = point;
            dusk = fzero(FCN,[point point+360]);
        else
            dawn = fzero(FCN,[point-360 point]);
            dusk = point;
        end
    else
        minlp = fminbnd(FCN,point-360,point);
        minrp = fminbnd(FCN,point,point+360);
        if FCN(minlp)>0 && FCN(minrp)>0
            dawn = minlp;
            dusk = minrp;
        elseif FCN(minlp)>0 && FCN(minrp)<0
            dawn = minlp;
            dusk = fzero(FCN,[point minrp]);
        elseif FCN(minlp)<0 && FCN(minrp)>0
            dawn = fzero(FCN,[minlp point]);
            dusk = minrp;
        elseif FCN(minlp)<0 && FCN(minrp)<0
            dawn = fzero(FCN,[minlp point]);
            dusk = minrp;
        end
    end
end
```

```
    dusk = fzero(FCN,[point minrp]);  
else  
    dawn = 0;  
    dusk = 0;  
end  
end  
end  
adawn = a+dawn/TdSi;  
adusk = a+dusk/TdSi;  
end
```

Priedas 4. Į Saulės sistemos kūno paviršių krentančios saulės šviesos energijos tankio apskaičiavimo funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje

```
function I = SEDens(a,SSB)
% Rezultatai: I - Saulės šviesos energijos tankis, W*rad/m^2.
% Kintamieji: a - orbitinis kampas, radianais;
%             SSB - Saulės sistemos kūnas:
%             'Me' - Merkurijus;
%             'Z' - Žemė;
%             'Ma' - Marsas;
%             'C' - Cerera.
%             Bet kokia kita SSB reikšmė gražina nulinį rezultatą!
% Programa:
I = 0;
switch SSB
case 'Me'
    rp = 46.001e+9; ra = 69.817e+9;
case 'Z'
    rp = 147.10e+9; ra = 152.10e+9;
case 'Ma'
    rp = 206.62e+9; ra = 249.23e+9;
case 'C'
    rp = 382.62e+9; ra = 445.41e+9;
otherwise
    return
end
A = (ra+rp)/2;
e = (ra-rp)/(ra+rp);
Lsun = 3.828e+26;
koef = Lsun/(8*pi*(A^2)*(1-e^2)^2);
I = koef*(a*(2+e^2) - 4*e*sin(a) + (e^2)*sin(2*a)/2);
end
```

Priedas 5. Orbitinių saulėlydžio ir aušros kampų radimo funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje

```
function [odawn odusk] = FindONA(a,l,R,Ro,eps,a0,No)
% Rezultatai:   odawn - objekto orbitinis aušros kampas, laipsniais;
%              odusk - objekto orbitinis saulėlydžio kampas, laipsniais.
% Kintamieji:  a      - kūno orbitinis kampas nuo afelio taško, laips.;
%              l      - kūno nuotolis iki Saulės, metrais;
%              R      - kūno spindulys, metrais;
%              Ro     - objekto orbitos spindulys, metrais;
%              eps    - obj. orbitinės ašies posvyris, laipsniais;
%              a0     - kūno orbitinis kampas tarp jo afelio ir
%                    objekto saulėgrįžos taškų, laipsniais;
%              No     - obj. orbitų skaičius per vienerius kūno sid. metus.
% Programa:
odawn = 0; odusk = 0;
Rs     = DtS(0, 'Sun');
Rol    = R*l/(Rs-R);
FCN    = @(B)(cosd(eps)*cosd(B)*cosd(a+a0+B/No)+sind(B)*sind(a+a0+B/No)...
            + (Rs*R-R^2)/(l*Ro) + sqrt((Ro^2-R^2)*(l^2-(Rs-R)^2))/(l*Ro));
FCNi   = @(B)(-cosd(eps)*cosd(B)*cosd(a+a0+B/No)-sind(B)*sind(a+a0+B/No)...
            - (Rs*R-R^2)/(l*Ro) - sqrt((Ro^2-R^2)*(l^2-(Rs-R)^2))/(l*Ro));
point  = fminbnd(FCN,0,360);
if FCN(point)<0 && Ro<Rol;
P1 = fminbnd(FCNi,point-360,point);
P2 = fminbnd(FCNi,point,point+360);
if FCN(P1)>=0 && FCN(P2)>=0
    odusk = fzero(FCN,[P1 point]);
    odawn = fzero(FCN,[point P2]);
end
end
end
```


Priedas 6. Laiko, reikalingo įveikti apskritiminės orbitos lanką, apskaičiavimo funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje

```
function [time SYIS] = tCOAL(Ro,Bs,Br,SSB)
% Rezultatai:   time - (Bs-Ba) lanko įveikimo laikas, sekundėmis;
%              SYIS - Siderinių kūno metų trukmė sekundėmis.
% Kintamieji:  Ro   - objekto orbitos spindulys, metrais;
%              Bs   - objekto orbitinis saulėlydžio kampas, radianais;
%              Br   - objekto orbitinis aušros kampas, radianais;
%              SSB  - Saulės sistemos kūnas:
%
%              'Me' - Merkurijus;
%              'Ve' - Venera;
%              'Z'  - Žemė;
%              'Ma' - Marsas;
%              'Vst' - Vesta;
%              'C'  - Cerera;
%              'J'  - Jupiteris;
%              'S'  - Saturnas;
%              'U'  - Uranas;
%              'N'  - Neptūnas;
%              'P'  - Plutonas;
%              'E'  - Eridė.
%
%              Bet kokia kita reikšmė gražina nulinį rezultatą!
% Programa:
Gc = 6.67e-11; time = 0; SYIS = 0;
switch SSB
case 'Me'
    bM = 3.3011e+23; SYID = 86.969;
case 'Ve'
    bM = 4.8675e+24; SYID = 224.70;
case 'Z'
    bM = 5.9724e+24; SYID = 365.26;
case 'Ma'
    bM = 6.4171e+23; SYID = 686.98;
case 'Vst'
    bM = 2.5890e+20; SYID = 1325.4;
case 'C'
    bM = 9.3930e+20; SYID = 1681.6;
case 'J'
    bM = 1.8986e+27; SYID = 4332.6;
case 'S'
    bM = 5.6800e+26; SYID = 10747;
case 'U'
    bM = 8.6800e+25; SYID = 30589;
case 'N'
    bM = 1.0200e+26; SYID = 59800;
case 'P'
    bM = 1.4600e+22; SYID = 90560;
case 'E'
    bM = 1.6600e+22; SYID = 203830;
otherwise
    return
end
time = sqrt((Ro^3)*(Br-Bs)^2/(Gc*bM)); SYIS = SYID*86400;
end
```

Priedas 7. Žemės atmosferos funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje

```
function [z T P] = EarthAtmosphere(h)
% Rezultatai:   z - geopotencialinė altitudė, metrais;
%              T - temperatūra altitudėje z, kelvinais;
%              P - slėgis altitudėje z, paskaliais.
% Kintamieji:
%              h - geometrinė stebėtojo altitudė, metrais.
% Programa:
Rep = 6356500;
z = round(Rep*h/(Rep+h));
gMR = 0.034163195;
L = [-0.0065 0 0.001 0.0028 0 -0.0028 -0.002 0];
if(z<=11000)
    T = 288.15+L(1)*z;
    P = 101325*(288.15/T)^(gMR/L(1));
end
if(z<=20000 && z>11000)
    [~,BT,BP] = EarthAtmosphere(11019);
    T = BT;
    P = BP*exp(-gMR*(z-11000)/BT);
end
if(z<=32000 && z>20000)
    [~,BT,BP] = EarthAtmosphere(20063);
    T = BT+L(3)*(z-20000);
    P = BP*(BT/T)^(gMR/L(3));
end
if(z<=47000 && z>32000)
    [~,BT,BP] = EarthAtmosphere(32162);
    T = BT+L(4)*(z-32000);
    P = BP*(BT/T)^(gMR/L(4));
end
if(z<=51000 && z>47000)
    [~,BT,BP] = EarthAtmosphere(47350);
    T = BT;
    P = BP*exp(-gMR*(z-47000)/BT);
end
if(z<=71000 && z>51000)
    [~,BT,BP] = EarthAtmosphere(51413);
    T = BT+L(6)*(z-51000);
    P = BP*(BT/T)^(gMR/L(6));
end
if(z<=84852 && z>71000)
    [~,BT,BP] = EarthAtmosphere(71802);
    T = BT+L(7)*(z-71000);
    P = BP*(BT/T)^(gMR/L(7));
end
if(z>84852)
    [~,BT,BP] = EarthAtmosphere(84852);
    T = BT;
    P = BP*exp(-gMR*(z-84852)/BT);
end
end
```

Priedas 8. Marso atmosferos storio radimas „GAMS“ programinėje aplinkoje

```
$inlinecom // //
OPTION      DNLP=SNOPT;                // SNOPT sprendimo algoritmas //

SCALAR
  Rmp        Marso spindulys asigaliu kryptimi      / 3376200 /
  R          Idealiuju duju konstanta                / 8.3145 /
  P0         slegis nulines atskaitos lygyje        / 610 /
  g0         laisvojo kritimo pagreitis             / 3.711 /
  T0         temperatūra nulines atskaitos lygyje   / 215 /
  M          moline atmosferos mase                 / 0.04334 /
  L          troposferos temperatūros kitimo koef. / -0.0025 /
  gMRL       konstanta  $(g0*M)/(R*L)^{-1}$           / 0 /;

VARIABLES
  h          Atmosferos storis
  X          Paklaida;

X.lo = 0;                // Nustatoma minimali X verte //
gMRL = (g0*M)/(R*L);    // Apskaiciuojama konstanta gMRL //

EQUATIONS
  EQUAL      Sulyginti slegius
  ERROR      Skaiciuoti paklaida;

EQUAL..      610*rPower(T0/(T0+L*(Rmp*h/(Rmp+h))),gMRL) =e= 0.37338;
ERROR..      X =e= 610*rPower(T0/(T0+L*(Rmp*h/(Rmp+h))),gMRL)-0.37338;

MODEL PRESSURE /ALL/;    // Aprasomas modelis ir jo f-jos //
SOLVE PRESSURE USING DNLP MINIMIZING X; // Sprendziamas modelis //

DISPLAY h.l, X.l;       // Spausdinami rezultatai //
```

Priedas 9. Marso atmosferos funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje

```
function [z T P] = MarsAtmosphere(h)
% Rezultatai:   z - geopotencialinė altitudė, metrais;
%              T - temperatūra altitudėje z, kelvinais;
%              P - slėgis altitudėje z, paskaliais.
% Kintamieji:
%              h - geometrinė stebėtojo altitudė, metrais.
% Programa:
Rmp = 3376200;
z = round(Rmp*h/(Rmp+h));
R = 8.3145;
P0 = 610;
g0 = 3.711;
T0 = 215;
M = 0.04334;
gMR = g0*M/R;
L = -0.0025;
if(z<=60000)
    T = T0+L*z;
    P = P0*(T0/T)^(gMR/L);
end
if(z>60000)
    [~,BT,BP] = MarsAtmosphere(61086);
    T = BT;
    P = BP*exp(-gMR*(h-60000)/BT);
end
end
```

Priedas 10. Absoliučiosios oro masės funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje

```

function SIGMA = AbsAirMass(hs,Th,Pl)
% Rezultatai:   SIGMA - absoliučioji oro masė.
% Kintamieji:
%
%           hs   - stebėtojo geometrinė altitudė, metrais;
%           Th   - zenitinis kampas, laispniais;
%           Pl   - planeta. 'M' - Marsas, kita reikšmė - Žemė.
% Programa:
RE = 6371000;           % Žemės volumetrinis spindulys
RM = 3389500;           % Marso volumetrinis spindulys
hAE = 86000;            % Žemės atmosferos storis
hAM = 53790;            % Marso atmosferos storis
ME = 0.02897;           % Žemės atmosferos molinė masė
MM = 0.04334;           % Marso atmosferos molinė masė
TOE = 288.15;           % Žemės paviršiaus temperatūra
TOM = 215;              % Marso paviršiaus temperatūra
R = 8.3144598;          % idealiųjų dujų konstanta
if(Th==90) Th=89.99999; end % jei theta lygus 90, jis sumažinamas
if(Pl=='M')              % jei planeta Marsas:
    if(hs>hAM)   hs=hAM;   end % steb. alt. negali būti > už atm. storį
    if(hs<0)     hs=0;     end % steb. alt. negali būti < už 0 m
    PRE=@(x)Mars(x);      % slėgio funkcija - Marso planetos
    Rp=RM; hA=hAM; M=MM; T0=TOM; % nustatomi kiti reikalingi parametrai
else                      % kitu atveju tai Žemė ir:
    if(hs>hAE)   hs=hAE;   end % steb. alt. negali būti > už atm. storį
    if(hs<-610) hs=-610;   end % steb. alt. negali būti < už -610 m
    PRE=@(x)Earth(x);     % slėgio funkcija - Žemės planetos
    Rp=RE; hA=hAE; M=ME; T0=TOE; % nustatomi kiti reikalingi parametrai
end

FUNCT = @(x)PRE(x)*(Rp+x)/sqrt((Rp+x)^2 - (Rp*sind(Th))^2);
SIGMA = M*integral(FUNCT,hs,hA,'ArrayValued',true)/(R*T0);

end

function PRESSURE = Mars(h) % vidinė f-ja Marso slėgiui apskaičiuoti
[~,~,PRESSURE] = MarsAtmosphere(h);
end

function PRESSURE = Earth(h) % vidinė f-ja Žemės slėgiui apskaičiuoti
[~,~,PRESSURE] = EarthAtmosphere(h);
end

```

Priedas 11. Papildytoji absoliučiosios oro masės funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje

```

function SIGMA = AbsAirMassExt(hs,Th,hh,Pl)
% Rezultatai: SIGMA - absoliučioji oro masė, kg/m^2.
% Kintamieji:
%
%           hs    - stebėtojo geometrinė altitudė, metrais;
%           Th    - zenitinis kampas theta, laipsniais;
%           hm    - stebėtojo geometrinė altitudė;
%           Pl    - planeta. 'M' - Marsas, kita reikšmė - Žemė.
% Programa:
RE = 6371000;           % Žemės volumetrinis spindulys
RM = 3389500;           % Marso volumetrinis spindulys
hAE = 86000;           % Žemės atmosferos storis
hAM = 53790;           % Marso atmosferos storis
ME = 0.02897;          % Žemės atmosferos molinė masė
MM = 0.04334;          % Marso atmosferos molinė masė
TOE = 288.15;          % Žemės paviršiaus temperatūra
TOM = 215;             % Marso paviršiaus temperatūra
R = 8.3144598;         % idealiųjų dujų konstanta
if(hs<-610) hs=-610;   end % stebėtojo altitudė visada >=-610 metrų
if(hs<0 && Pl=='M') hs=0; end % Marse hs visada >=0 metrų
if(hs>hAE) hs=hAE;    end % hs nedaugiau už atmosferos storį Žemėje
if(hs>hAM && Pl=='M') hs=hAE; end % Marse hs nedaugiau už jo atm. storį
if(Pl=='M')
    PRE=@(x)Mars(x);   % slėgio funkcija - Marso planetos
    Rp=RM; hA=hAM; M=MM; T0=TOM; % nustatomi kiti reikalingi parametrai
else
    PRE=@(x)Earth(x);  % slėgio funkcija - Žemės planetos
    Rp=RE; hA=hAE; M=ME; T0=TOE; % nustatomi kiti reikalingi parametrai
end
if(hh>hs) hh=hs;      end % matomasis horizontas nedidesnis nei hs
Thm = MaxTheta(hs,hh,Pl); % gaunamas maksimalus zen. kampas
if(Th<0) Th=0;        end % theta nemažiau už 0 laipsnių
if(Th>Thm) Th=Thm;    end % theta nedaugiau už theta[max]
if(Th==90) Th=89.99999; end % programos vykdymo sumetimais Th<>90
if(Th<90)
    FUNCT = @(x)PRE(x)*(Rp+x)/sqrt((Rp+x)^2 - (Rp*sind(Th))^2);
    SIGMA = M*integral(FUNCT,hs,hA,'ArrayValued',true)/(R*T0);
else
    hmin = Rp*(sind(Th)-1)+hs*sind(Th);
    FUNCT = @(x)PRE(x)*(Rp+x)/sqrt((Rp+x)^2 - Rp^2);
    INT1 = integral(FUNCT,hmin,hA,'ArrayValued',true);
    INT2 = integral(FUNCT,hmin,hs,'ArrayValued',true);
    SIGMA = M*(INT1+INT2)/(R*T0);
end
end

function PRESSURE = Mars(h) % vidinė f-ja Marso slėgiui apskaičiuoti
[~,~,PRESSURE] = MarsAtmosphere(h);
end

function PRESSURE = Earth(h) % vidinė f-ja Žemės slėgiui apskaičiuoti
[~,~,PRESSURE] = EarthAtmosphere(h);
end

```

Priedas 12. Maksimalaus zenitinio kampo funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje

```
function Thm = MaxTheta(hs,hh,Pl)
% Rezultatai:   Thm - maksimalus zenitinis kampas (theta), laipsniais.
% Kintamieji:
%              hs - stebėtojo geometrinė altitudė;
%              hm - matomojo horizonto altitudė;
%              Pl - planeta. 'M' - Marsas, kita reikšmė - Žemė.
% Programa:
RE = 6371000;           % Žemės volumetrinis spindulys
RM = 3389500;           % Marso volumetrinis spindulys
if(hs<-610) hs=-610;    end % stebėtojo altitudė visada >=-610 metrų
if(hs<0 && Pl=='M') hs=0; end % Marse hs visada >=0 metrų
if(hh>hs) hh=hs;       end % matomasis horizontas nedidesnis nei hs
if(Pl=='M')             % jei planeta Marsas:
    Thm = 180-asind((RM+hh)/(RM+hs));
else                     % kitu atveju tai Žemė, todėl:
    Thm = 180-asind((RE+hh)/(RE+hs));
end
end
```

Priedas 13. „HITRAN“ duomenų bazės spektrinių duomenų nuskaitymo iš bylos funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje

```
function [nu S ys] = ReadHiTranData(element)
% Rezultatai:   nu - bangos numeris;
%              S  - Spektrinės linijos intensyvumas;
%              ys - pusiniai savitojo nuokrypio koeficientai.
% Kintamieji:  element - cheminio komponento pavadinimas.
% Programa:
temp = [];
nu    = [];
S     = [];
ys    = [];
switch element
case 'N2'
    file = 'C:\Users\ACERPC\Documents\MATLAB\HiTran\N2.txt';
case 'O2'
    file = 'C:\Users\ACERPC\Documents\MATLAB\HiTran\O2.txt';
case 'CO2'
    file = 'C:\Users\ACERPC\Documents\MATLAB\HiTran\CO2.txt';
case 'H2O'
    file = 'C:\Users\ACERPC\Documents\MATLAB\HiTran\H2O.txt';
case 'CH4'
    file = 'C:\Users\ACERPC\Documents\MATLAB\HiTran\CH4.txt';
case 'O3'
    file = 'C:\Users\ACERPC\Documents\MATLAB\HiTran\O3.txt';
otherwise
    return;
end
temp = csvread(file);
nu = temp(:,1);
S  = temp(:,2);
ys = temp(:,3);
end
```


Priedas 14. Azoto dujų molinio ekstinkcijos ploto apskaičiavimo programa „MATLAB“ programinėje aplinkoje

```
clear all
clc
format long;

dk = 0.1;
mink = 2500;
maxk = 100000;
halfbroad = 100;

NA = 6.022140858e+23;
KA = mink:dk:maxk;
Km = [];

[nu Sys] = ReadHiTranData('N2');
nulo = min(nu);
nuhi = max(nu);
vano = length(nu);
step = (nuhi-nulo)/vano;

for j=1:length(KA)
    k = KA(j);
    Array = [];
    tmp = abs(nu-k);
    [~,eqv] = min(tmp);
    deqv = ceil(halfbroad/step);
    lstp = eqv-deqv;
    hstp = eqv+deqv;
    if lstp < 1; lstp = 1; end;
    if hstp > length(S); hstp = length(S); end;
    for i=lstp:hstp
        Array(i) = S(i)*( atan((k+dk-nu(i))/ys(i))-atan((k-dk-nu(i))/ys(i)) );
    end
    Km(j) = (NA/10000)*(sum(Array(:))/(2*dk*pi));
    display(['Processing ',num2str(j),' out of ',num2str(length(KA)), ...
            ' at wavenumber ', num2str(k),' similar to ', num2str(nu(eqv))]);
end

WrArr = [];
WrArr(:,1)=KA;
WrArr(:,2)=Km;
dlmwrite('C:\Users\ACERPC\Documents\MATLAB\CrossSections\N2.txt',WrArr, ...
        'delimiter',' ','newline','pc','precision',8)
```

Priedas 15. Atmosferos ir jos komponentių optinio gylio apskaičiavimo funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje

```
function [OpDe ODi] = OptDepth(hA,AAM,AAMzen,ECS,M)
% Rezultatai:   OpDe   - atmosferos optinis gylis;
%              ODi    - optinio gylio vektorius atmosferos komponentėms.
% Kintamieji:  AAM    - absoliučioji oro masė spindulio kryptimi, kg/m^2;
%              AAMzen - absoliučioji oro masė zenito kryptimi, kg/m^2;
%              ECS    - ekstinkcijos plotų vektorius;
%              M      - atmosferos komponentių molinės masės vektorius.
% Programa:
K      = [];
ODi    = [];
NA     = 6.02214179e+23;
OpDe   = 0;
for i=1:length(ECS)
    K(i) = ECS(i)/M(i);
    ODi(i) = hA*NA*(AAM^2)*K(i)/AAMzen;
    OpDe   = OpDe+ODi(i);
end
end
```

Priedas 16. Planko juodojo kūno spinduliuotės funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje

```
function I = Planck(ld,T)
% Rezultatai:  I    - JK spektrinė energinė apšvieta, W/(nm*m^2).
% Kintamieji:  ld   - bangos ilgis, nm;
%              T    - absoliučioji JK temperatūra, K;
% Programa:
if ld==0
    I = 0;
else
    h = 6.626070041e-34;
    c = 299792458;
    k = 1.380650424e-23;
    lm = ld*(1e-9);
    I = ((1e-9)*2*h*(c^2)/(lm^5))/(exp((h*c)/(lm*k*T))-1);
end
end
```

Priedas 17. Juodojo kūno energinės apšvietos nurodatame bangų ilgių diapazone apskaičiavimo funkcija „MATLAB“ programinėje aplinkoje

```
function j = BBR(ld1,ld2,T)
% Rezultatai:    j    - JK energinė apšvieta, W*nm/m^2.
% Kintamieji:   ld1  - bangos ilgių diapazono pradžia, nm;
%               ld2  - bangos ilgių diapazono pabaiga, nm;
%               T    - absoliučioji JK temperatūra, K;
% Programa:
if (ld2-ld1)<=0
    j = 0;
else
    h    = 6.626070041e-34;
    c    = 299792458;
    k    = 1.380650424e-23;

    ldtox = @(ld)(h*c*(1e+9)/(ld*k*T));
    FCN    = @(x)(x^3/(exp(x)-1));
    const  = (2*pi*k^4*T^4)/(c^2*h^3);
    j = const*integral(FCN,ldtox(ld2),ldtox(ld1),'ArrayValued',true);
end
end
```