

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



**MODELOVÁNÍ INTENZITY SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ PRO
MÍSTA MĚSÍČNÍCH ZÁKLADEN**

**MODELING OF SOLAR IRRADIANCE FOR LUNAR BASE
LOCATIONS**

Diplomová práce

Bc. Jakub Čašek

Srpen 2014

Vedoucí diplomové práce: Mgr. Lukáš Brůha

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 27. srpna 2014

.....
Jakub Čašek

Poděkování

Zde bych rád poděkoval svému školiteli Mgr. Lukáši Brůhovi za věnovaný čas, cenné rady a za jeho trpělivost. Dále děkuji doc. Ing. Janu Kolářovi CSc. za kritické poznámky, věcné připomínky a odbornou kontrolu textu. Také bych rád poděkoval Ing. arch. Ondřeji Doule Ph.D. M.Sc. za pomoc s výběrem tématu. Dále děkuji RNDr. Jakubu Lysákovi za technické rady při konzultacích. V neposlední řadě děkuji celé své rodině, že mě podporovala po celou dobu studia.

Modelování intenzity slunečního záření pro místa měsíčních základen

Pro výběr vhodného místa pro vybudování lunární základny je jedním z mnoha důležitých faktorů také množství dopadajícího slunečního záření. Tato práce vytváří nový postup pro modelování intenzity ozařování Sluncem v libovolném místě měsíčního povrchu a libovolném čase. Zastínění okolním terénem je počítáno pomocí prostorového průniku linií osvětlení s digitálním modelem terénu. Model také počítá s vlivem proměnlivé vzdálenosti Měsíce od Slunce a s plošnou reprezentací zdroje záření. V práci je vytvořen a implementován nový geometrický postup výpočtu odraženého záření. Finální model je zalgoritimizován v jazyce Python pod softwarem ArcGIS jako spustitelný skript nad volně dostupnými daty ze sondy Lunar Reconnaissance Orbiter.

Klíčová slova: Měsíc, intenzita ozařování Sluncem, GIS modelování, skriptování

Modeling of solar irradiance for lunar base locations

Abstract

An incident radiation is an essential factor for a discovery of a place suitable for building a lunar base. This thesis presents a new approach for modeling of solar irradiance in an arbitrary lunar location at selected time. Shadowing by surrounding terrain is calculated by spatial intersection between lines of illumination and digital terrain model. Model also takes variable distance between Moon and Sun and areal representation of the Sun into account. In this thesis a new geometrical procedure for calculation of reflected irradiance is designed. The resulting model is implemented within ArcGIS software as an executable script, which utilizes the freely available data from Lunar Reconnaissance Orbiter as an input.

Key words: Moon, solar irradiance, geoinformatic modelling, scripting

Obsah

Seznam obrázků a tabulek.....	7
1. Úvod.....	8
2. Úvod do problematiky.....	10
2.1 Elektromagnetické záření	10
a) Elektromagnetické spektrum	13
b) Radiometrické veličiny	14
c) Interakce záření s povrchem	15
2.2 Modely osvětlení	16
a) Model ESRI Solar radiation.....	17
b) Model r.sun	18
c) Model ASHRAE	19
d) Teoretický model osvětlení Měsíce Li a kol.	20
2.3 Výběr modelu a cíle práce	21
3. Metodika	23
3.1 Zdroje záření	23
a) Výpočet solární konstanty.....	23
b) Záření emitované Zemí, planetami a vzdálenými hvězdami.....	25
c) Sluneční záření odražené od Země	27
d) Reprezentace zdroje záření.....	27
3.2 Odražené záření.....	30
a) Odražené záření v současných modelech	31
b) Výpočet spektrální odrazivosti regolitu ve viditelném spektru	33
c) Postup výpočtu odraženého záření.....	35
3.3 Zastínění přímého slunečního záření a jeho intenzita	40
4. Popis dat a algoritmizace	45
4.1 Instrument Lunar Orbiter Laser Altimeter	45
4.2 Popis dat	47
4.3 Filtrace dat	48
4.4 Oprava výšek povrchu.....	50
4.5 Data JPL Horizons.....	51
4.6 Popis a funkčnost výsledného skriptu	54
a) Funkce astrodata.....	55
b) Funkce projection.....	55
c) Funkce filt.....	56
d) Funkce reflect.....	57
e) Funkce visible_point.....	58

5. Diskuse nad výsledky	63
5.1 Výsledky filtrace.....	63
5.2 Hodnocení částečného zastínění a odraženého záření	65
5.3 Vizualizace osvětlení	68
5.4 Zhodnocení optimalizace.....	71
6. Závěr	73
7. Použitá literatura	75
Seznam příloh	78

Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1 – Rovinná elektromagnetická vlna	10
Obr. 2 – Spektrální intenzita vyzařování absolutně černého tělesa	12
Obr. 3 – Typy geometrických odrazů záření	16
Obr. 4 – Úhlová velikost slunečního kotouče	29
Obr. 5 – Rozdělení slunečního kotouče	30
Obr. 6 – Spektrální křivky odrazivosti	30
Obr. 7 – Srovnání velikosti složek záření v modelu r.sun	32
Obr. 8 – Spektrální křivky lunárního regolitu.....	34
Obr. 9 – Grafické odečtení hodnot odrazivosti	35
Obr. 10 – Zákres roviny XYZ a úhlu sklonu a orientace	37
Obr. 11 – Schéma výpočtu souřadnic bodu S	38
Obr. 12 – Odchylka vektoru odraženého záření a normálového vektoru roviny.....	39
Obr. 13 – Porovnávání kritických elevací.....	40
Obr. 14 – Schéma výpočtu výšky Slunce nad obzorem	42
Obr. 15 – Výpočet azimutu ze souřadnic	43
Obr. 16 – Transformace sférických souřadnic na pravoúhlé.....	43
Obr. 17 – Instrument Lunar Orbiter Laser Altimeter	45
Obr. 18 – Rozložení laserových pulsů	46
Obr. 19 – Vzorky dat dle selenografické šířky	47
Obr. 20 – Vizualizace chybných výškových hodnot.....	49
Obr. 21 – Chybná data z oblasti 83° s.š, 130° v.d.....	49
Obr. 22 – Oprava výšek povrchu	51
Obr. 23 – Formulář skriptu pro vkládání dat v prostředí ArcToolbox	59
Obr. 24 – Modely terénu před a po filtraci	64
Obr. 25 – Částečné zastínění	65
Obr. 26 – Lokace pro výpočet odraženého záření.....	67
Obr. 27 – Intenzita ozařování rovinné plochy	69
Obr. 28 – Vizualizace osvětlení povrchu	71
Tab. 1 – Rozdělení elektromagnetického spektra.....	13
Tab. 2 – Radiometrické veličiny	14
Tab. 3 – Poměry odrazivosti vzorků v IR a VIS.....	35
Tab. 4 – Parametry instrumentu LOLA.....	46
Tab. 5 – Výsledky ozařování při částečném zastínění včetně odraženého záření.....	66
Tab. 6 – Výsledky odraženého záření.....	67

1. Úvod

Světlo a z něj vytvořené teplo bylo už od počátku vývoje naší planety klíčovou podmínkou pro vznik života i životního prostředí. Proces vytváření světla a celkově záření je jedním ze základních fyzikálních principů vesmíru. Velmi důležitá je také vzájemná poloha Země a Slunce, která kdyby byla jen o trochu jiná, záření od Slunce by bylo málo nebo moc, a život, tak jak ho známe dnes, by vůbec nevznikl.

Světlo hraje klíčovou roli i pro vnímání okolního světa člověkem, protože nejvíce vjemů získává zrakem. Pokud by lidské tělo nebylo schopné pozorovat svět očima, zajisté by se civilizace nerozvinula do dnešní podoby. I objevování okolního světa by bylo podstatně komplikovanější. Jak napsal švédský spisovatel Jonas Ridderstråle: *„I ti nejtalentovanější jedinci potřebují při průchodu neznámým terénem světlo.“*

Proto i při objevování vesmíru, jakožto počinu, při kterém jsou posunovány hranice chápání světa a lidského vývoje, je třeba se zářením a jeho intenzitou zabývat. Z něj lze vyčíst velmi důležité informace například o fyzikálních vlastnostech vesmírných objektů. Také při přípravě na vesmírné mise je důležité vědět, jaké množství záření lze v daném místě očekávat. To totiž ovlivňuje celou řadu dalších veličin jako třeba teplotu nebo množství elektřiny, kterou jsou schopny vyrobit fotovoltaické panely.

V současnosti nejvíce diskutovaným vesmírným cílem je cesta na Mars s lidskou posádkou. Z velké míry je to dáno touhou po dosažení prvenství a zapsání se tak do historie vesmírných objevů. Probíhají simulované mise dlouhého letu a jsou vybírání potencionální astronauti, kteří zasvětili objevování Rudé planety celý život a podniknou tam jednosměrnou cestu.

Přesto se tato diplomová práce nezabývá Marsem, ale Měsícem. Ačkoliv není Měsíc svou velikostí, gravitací a atmosférou tolik podobný Zemi jako Mars, má několik nesporných výhod, které jej staví do pozice vhodného tělesa pro prvotní výzkum a exploraci, která poskytne neocenitelné zkušenosti pro cestování nejen na Mars ale i dále. Nejdůležitější je relativní poloha Měsíce vůči Zemi. Pokud pomineme asteroidy a umělé družice, je Měsíc od Země nejbližším tělesem. To se promítá zejména do délky cesty, možností komunikace a do výše celkových finančních nákladů. Vzdálenost má také přímý dopad na zásobování. To jsou jen některé z mnoha předností, které Měsíc před Marsem má.

Částečně limitující komplikací pro obyvatele měsíční základny může být nízká gravitace, zejména kvůli ztrátě tělesné hmoty. Na druhou stranu je nízká gravitace dobře

využitelná například pro instalaci velkých dalekohledů, které by v zemské gravitaci nebylo možné provozovat. Ty je nejvýhodnější umístit do trvale zastíněných kráterů, kvůli odstínění okolního záření, čímž jsou vytvořeny jedinečné podmínky pro vesmírný výzkum.

Přesný odhad intenzity záření na Měsíci je proto důležitou hodnotou, na základě které jsou vytvářeny návrhy konstrukcí základů. Také je jedním z určujících faktorů při výběru přistávací lokace. Tato práce chce přispět možným řešením modelování intenzity slunečního záření, a poskytnout tak přesnou hodnotu pro další rozhodování. Je kladen důraz na jedinečnosti Měsíce a zároveň jsou rozvíjeny obecně uplatnitelné postupy výpočtu osvětlení.

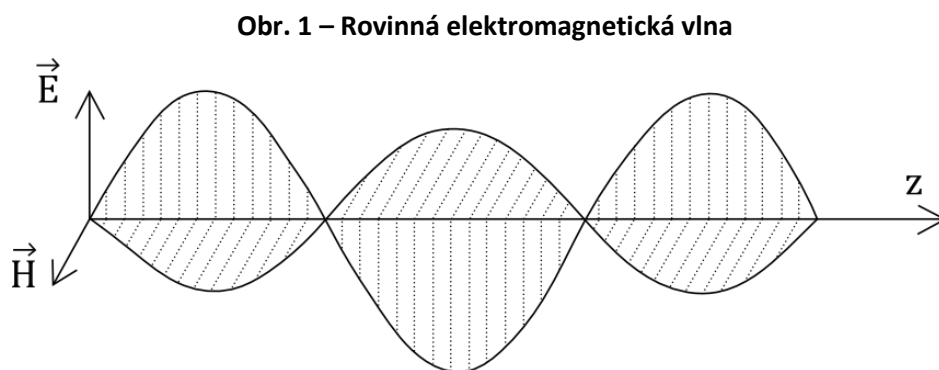
Tato práce se zabývá modelováním intenzity ozařování v libovolném bodě měsíčního povrchu. Na začátku bude popsáno elektromagnetického záření, jeho vznik, a fyzikální veličiny a principy které se k jeho popisu využívají. Dále budou rozebrány některé současné modely osvětlení, které jsou využívány při výpočtu intenzity osvětlení na Zemi a na Měsíci a budou diskutovány jejich rozdíly. Následně bude rozhodnuto o aplikaci konkrétního modelu a budou popsány cíle práce. V další části práce budou teoreticky rozebrány jednotlivé aspekty modelování osvětlení, jako je počet zdrojů záření, reprezentace zdroje záření v modelu, zahrnutí vlivu proměnné vzdálenosti mezi Sluncem a Měsícem, výpočet přímého slunečního záření s vlivem zastínění okolním reliéfem nebo výpočet odraženého záření. V další části budou popsána data, která byla pro výpočet použita a jejich úpravy. Také bude podrobně popsán postup algoritmizace modelu v jazyce Python a vybraném geoinformačním softwaru ArcGIS a programový kód bude jednotlivě rozebrán. Na závěr budou jednotlivé části modelu otestovány a budou zhodnoceny výsledky. K práci je finální model přiložen jako spustitelný skript pod výše zmíněným programem.

2. Úvod do problematiky

V této kapitole bude popsán fyzikální základ elektromagnetického záření a rozdělení podle vlnových délek. Také bude uvedena Planckova rovnice, Stefanův-Boltzmannův zákon a Wienův posunovací zákon. Budou stanoveny definice absolutně černého tělesa, dokonalého odražeče, šedého a barevného zářiče. Dále budou popsány radiometrické veličiny. V další části budou rozebrány modely osvětlení, které jsou v současnosti využívány. Bude rozebrán model společnosti ERSI *Solar radiation*, který je využit v softwaru *ArcGIS*. Dalším rozebraným modelem bude *r.sun*, který je implementován v open source softwaru *GRASS GIS*. Dalším modelem bude *ASHRAE*, který je využíván architektky a inženýry. Jako poslední bude rozebrán model Li a kol., který se přímo zabývá Měsícem. V poslední části bude vybrán konkrétní model pro aplikaci v této práci a budou představeny cíle práce.

2.1 Elektromagnetické záření

Elektromagnetické záření vzniká transformací z jiných forem energií, a nese tedy určité množství energie. Typ energie, ze které je záření přeměněno, určuje vlnovou délku záření, ta se značí λ a je to délková vzdálenost mezi jednotlivými vrchy vlny. Mezi hlavní typy energie, ze kterých je elektromagnetické záření přeměňováno, patří jaderná, tepelná, chemická, kinetická, magnetická či elektrická energie. Elektromagnetické záření se chová jako vlna, až na velmi krátké vlnové délky, kdy je potřeba s ním počítat v kvantech. Tímto oborem se zabývá kvantová fyzika. (Havelková, Pavelka, 2005) Elektromagnetická vlna, jak její název napovídá, má dvě složky, elektrickou a magnetickou, z nichž obě mají svou velikost a směr. Na Obr. 1 je znázorněna rovinná elektromagnetická vlna ve směru osy z , kde \vec{E} je velikost elektrického pole a \vec{H} je velikost magnetického pole. Skalární součin jednotlivých složek roven intenzitě záření M (Kolář, 2011a).



Zdroj: Malý, 2008

Rychlost s jakou se vlna šíří prostředím je závislá na elektromagnetických vlastnostech tohoto prostředí a ty popisují veličiny permitivita, pro elektrické vlastnosti, a permeabilita, pro magnetické vlastnosti. Ve vakuu je rychlost šíření vlny rovna rychlosti světla.

„Tepelná energie je kinetickou energií s náhodným pohybem částic zdroje. Tento náhodný pohyb způsobuje excitaci (elektronů, vibrační nebo rotační) po vzájemných kolizích částic, po nichž následuje emise elektromagnetických vln.“ (Havelková, Pavelka, 2005, s. 7)

Podmínkou vzniku elektromagnetického záření je změna v pohybu nabitých částic. Protože nabitá částice jsou součástí každé hmoty, každé těleso vyzařuje určité množství záření, které je závislé na jeho teplotě. (Kolář, 2011a) Těleso, které dokáže přeměnit maximum tepelné energie na energii zářivou, se nazývá absolutně černé těleso. Hodnota intenzity vyzařování je proměnlivá s vlnovou délkou a tento průběh popisuje Planckova rovnice (Havelková, Pavelka, 2005).

$$M_{\check{\lambda}} = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} = \frac{2\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c \cdot h/(\lambda k T)} - 1} \quad (2.1.1)$$

kde h je Planckova konstanta ($6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s⁻¹), k je Boltzmannova konstanta ($5,6704 \cdot 10^{-8}$ Wm⁻²K⁻⁴), c je rychlost světla, T je absolutní teplota v kelvinech. (Havelková, Pavelka, 2005).

Spektrální křivky intenzity vyzářené energie jsou vidět na Obr. 2. Z Planckovy rovnice je možné spočítat vlnovou délku, na které je spektrální vyzařování maximální. Tento vztah zformuloval německý fyzik Wilhelm Wien a jmenuje se Wienův posunovací zákon:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (2.1.2)$$

kde b je Wienova konstanta rovna $2,898 \cdot 10^{-3}$ mK a T je teplota.

Další rovnicí, která vyplývá z Planckovy rovnice, je Stefanův-Boltzmannův zákon. Ten popisuje celkové množství vyzářené energie absolutně černým tělesem v závislosti na jeho teplotě:

$$M = \sigma T^4 \quad (2.1.3)$$

kde σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta rovná $5,6704 \cdot 10^{-8}$ Wm⁻²K⁻⁴ a T je teplota v kelvinech. (Havelková, Pavelka, 2005)

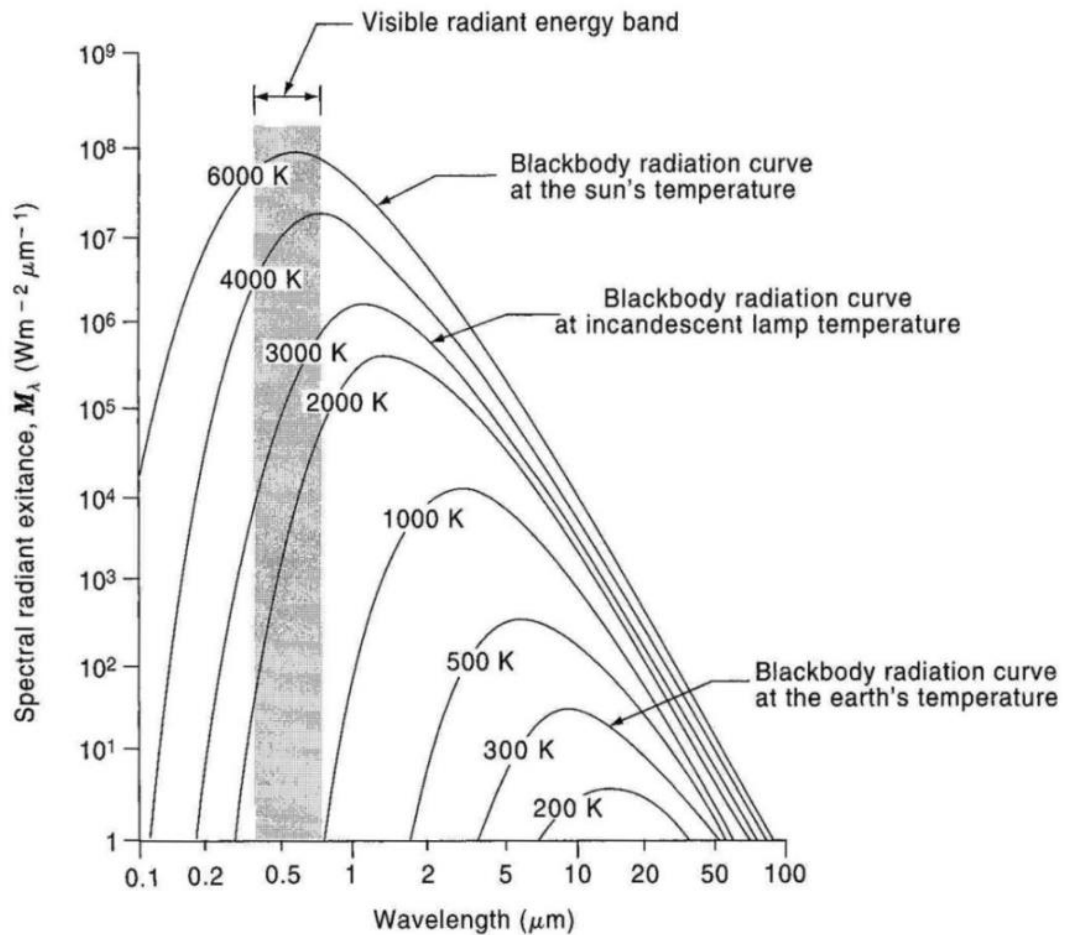
Absolutně černé těleso je však pouze teoretický objekt, a tak každý reálný objekt emituje záření vždy méně. Poměr skutečně vyzářené energie reálným tělesem oproti

vyzářené energii absolutně černým tělesem o stejné teplotě se nazývá spektrální emisivita a charakterizuje tedy míru schopnosti tělesa vyzařovat elektromagnetické záření.

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{M_\lambda}{M_{\check{c}\lambda}} \quad (2.1.4)$$

kde $\varepsilon(\lambda)$ je spektrální emisivita na vlnové délce λ , M_λ je energie vyzařená reálným tělesem na stejné vlnové délce a $M_{\check{c}\lambda}$ je energie vyzařená absolutně černým tělesem také na téže vlnové délce.

Obr. 2 – Spektrální intenzita vyzařování absolutně černého tělesa



Zdroj: Lillesand ... [et al.], 2004

Podle emisivity dělíme tělesa na několik typů. Absolutně černé těleso již bylo zmiňováno a již z definice emisivity vyplývá, že bude mít spektrální emisivitu rovnou jedné. Dalším typem je šedý zářič. Ten vyzařuje méně než černé těleso, ale jeho spektrální emisivita je na všech vlnových délkách konstantní. Naopak barevný zářič vyzařuje na různých vlnových délkách s různou intenzitou. Posledním typem je bílý zářič, který nevyzařuje žádné záření. Je to podobně jako černé těleso teoretický případ, protože má

teplotu rovnou absolutní nule a žádnou vnitřní energii a zároveň nepřijímá žádné záření. Je to tedy dokonalý odražeč. (Havelková, Pavelka, 2005)

Z Planckova zákona také vyplývá, že každé těleso vyzařuje elektromagnetické záření na všech vlnových délkách a v krajních hodnotách se limitně blíží nule. Také platí, že teplejší těleso vyzařuje na všech vlnových délkách více než těleso chladnější. (Reichl, Všetická, 2014)

a) Elektromagnetické spektrum

Záření v celém rozsahu vlnových délek je označováno jako elektromagnetické spektrum. Lidské oko je schopné vnímat záření jen ve zlomku tohoto spektra. To se označuje jako viditelné záření. To že se viditelné světlo skládá ze záření různých vlnových délek, dokázal poprvé Isaac Newton již v roce 1666 pomocí optického hranolu. Sir W. Herschel objevil v roce 1800 infračervené záření a později bylo dokázáno, že má podobné vlastnosti jako záření viditelné. Na to navázal J. C. Maxwell a v roce 1873 vytvořil teorii elektromagnetického záření a také popsal elektromagnetické pole rovnicemi. (Havelková, Pavelka, 2005)

Elektromagnetické spektrum rozdělujeme podle vlnových délek a vlastností záření do několika kategorií, které přehledně shrnuje Tab. 1.

Tab. 1 – Rozdělení elektromagnetického spektra

Obor spektra	Vlnový rozsah	Způsob vzniku
Kosmické záření (gama)	$< 10^{-13}$ m	Rozklad jader atomů
Rentgenové záření	$10^{-13} - 10^{-8}$ m	Brzděné elektrony
Ultrafialové záření	$4 \cdot 10^{-7} - 10^{-8}$ m	Pohyb iontů, elektronů
Viditelné záření	$4 \cdot 10^{-7} - 7 \cdot 10^{-7}$ m	Pohyb iontů, elektronů
Infračervené záření	$7 \cdot 10^{-7} - 10^{-3}$ m	Pohyb iontů, elektronů
Mikrovlnné záření	$10^{-3} - 10^{-1}$ m	Pohyblivé elektrony
Radiové záření	$> 10^{-1}$ m	Pohyblivé elektrony

Zdroj: Kolář, 2011a

Jednotlivé obory spektra jsou pro další potřebu ještě podrobněji rozdělovány, čehož se využívá například v dálkovém průzkumu země. Rozděluje se viditelné záření podle barev, od nejkratší vlnové délky na fialovou, modrou, zelenou, žlutou, oranžovou a červenou. Dále infračervené na blízké, střední, vzdálené a submilimetrové. Na pásma označená písmeny se rozdělují mikrovlnné záření na Ka-K-Ku, X, C, S, L a P. To je využíváno především při radarových měřeních.

b) Radiometrické veličiny

Veličiny popisující záření se rozdělují na fotometrické a radiometrické. Radiometrické veličiny popisují přenos a množství energie záření obecně, kdežto fotometrické veličiny se zabývají pouze viditelným spektrem a vnímáním světla.

Základní veličina, která popisuje množství energie přenášené vlnou, se nazývá zářivá energie a značí se Q . Závisí na vlnové délce a na Planckově konstantě, tedy:

$$Q = h f = h c / \lambda \quad (2.1.5)$$

kde f je frekvence vlny a c je rychlost světla. (Kolář, 2011a)

Další radiometrické veličiny ze zářivé energie přímo vycházejí a jsou shrnuty v Tab. 2.

Tab. 2 – Radiometrické veličiny

Veličina	Symbol	Definiční vztah	Fyzikální rozměr
zářivá energie	Q	-	J
zářivý tok	ϕ	$\phi = dQ / dt$	W
intenzita vyzařování	M	$M = d\phi / dA$	$W \cdot m^{-2}$
intenzita ozařování	E	$E = d\phi / dA$	$W \cdot m^{-2}$
zářivost	I	$I = d\phi / d\Omega$	$W \cdot sr^{-1}$
zář	L	$L = dI / dA \cos\theta$	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$
poloprostorová odrazivost	ρ	$\rho = M_p / E$	1
poloprostorová propustnost	τ	$\tau = M_t / E$	1
poloprostorová absorpce	α	$\alpha = M_a / E$	1

Zdroj: Havelková, Pavelka, 2005

kde A je plocha, Ω je prostorový úhel a θ je úhel pozorování.

Protože hodnota každé radiometrické veličiny závisí na vlnové délce, pro určité výpočty se používají spektrální veličiny. Ty jsou vztaženy k určité vlnové délce (například spektrální intenzita vyzařování M_λ [$W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$]). (Kolář, 2011a)

Zářivý tok označuje rychlost přírůstku nebo úbytku zářivé energie v daném místě. Intenzita vyzařování a ozařování se neliší výpočtem ale pouze geometrickým významem. Je to hodnota zářivého toku, který buď dopadá na určitou plochu, jedná se tedy o ozařování, nebo je odražena či vyzářena z určité plochy, jedná se tedy o vyzařování. Zářivost se vztahuje k bodovému zdroji, z něhož se vyzařuje či odráží záření v určitém prostorovém úhlu. „Zář je zářivým tokem do jednotkového prostorového úhlu do daného

směru jednotkovým plošným průmětem plochy do roviny kolmé na daný směr.“ (Havelková, Pavelka, 2005, s. 15)

Dalším termínem, který se v praxi využívá, je albedo. To označuje odrazivost přírodních objektů, které lze měřit v určité výšce nad zemským povrchem. Albedo v určité výšce je dáno poměrem toku záření odcházejícího s atmosféry a dopadajícího v této výšce k Zemi (Havelková, Pavelka, 2005). Albedo se využívá například pro stanovení odrazivosti planet, a obsahuje tedy i záření atmosféry.

c) Interakce záření s povrchem

Při změně prostředí, kterým se elektromagnetické záření šíří, se mění i materiálové konstanty. Když vlna přechází z jednoho prostředí do druhého, část energie nesené vlnou látkou projde, část je absorbována a část se odrazí. Tedy intenzita ozařování je rovna součtu těchto částí:

$$E = M_{\rho} + M_{\alpha} + M_{\tau} \quad (2.1.6)$$

Při využití veličin z Tab. 2 je celkový součet roven jedné, tedy:

$$\rho + \tau + \alpha = 1 \quad (2.1.7)$$

Koeficient odrazivosti je poměr dvou hodnot intenzity záření, a je to tedy bezrozměrná hodnota. Jeho hodnotu ovlivňuje vlnová délka dopadajícího záření, úhel dopadu, polarizace záření, struktura (nerovnost) povrchu, na který záření dopadá, a jeho elektromagnetické vlastnosti. (Kolář, 2011b)

Důležitý je směr odrazu tohoto záření. Pro velmi hladký povrch platí známý vztah:

$$\theta = \theta'$$

tedy, že úhel dopadu θ je roven úhlu odrazu θ' . Avšak žádný povrch není dokonale hladký. Význam velikosti nerovností se mění s vlnovou délkou záření (Havelková, Pavelka, 2005). Pro zjištění, zda lze povrch považovat za hladký, je využíváno Rayleighova kritéria:

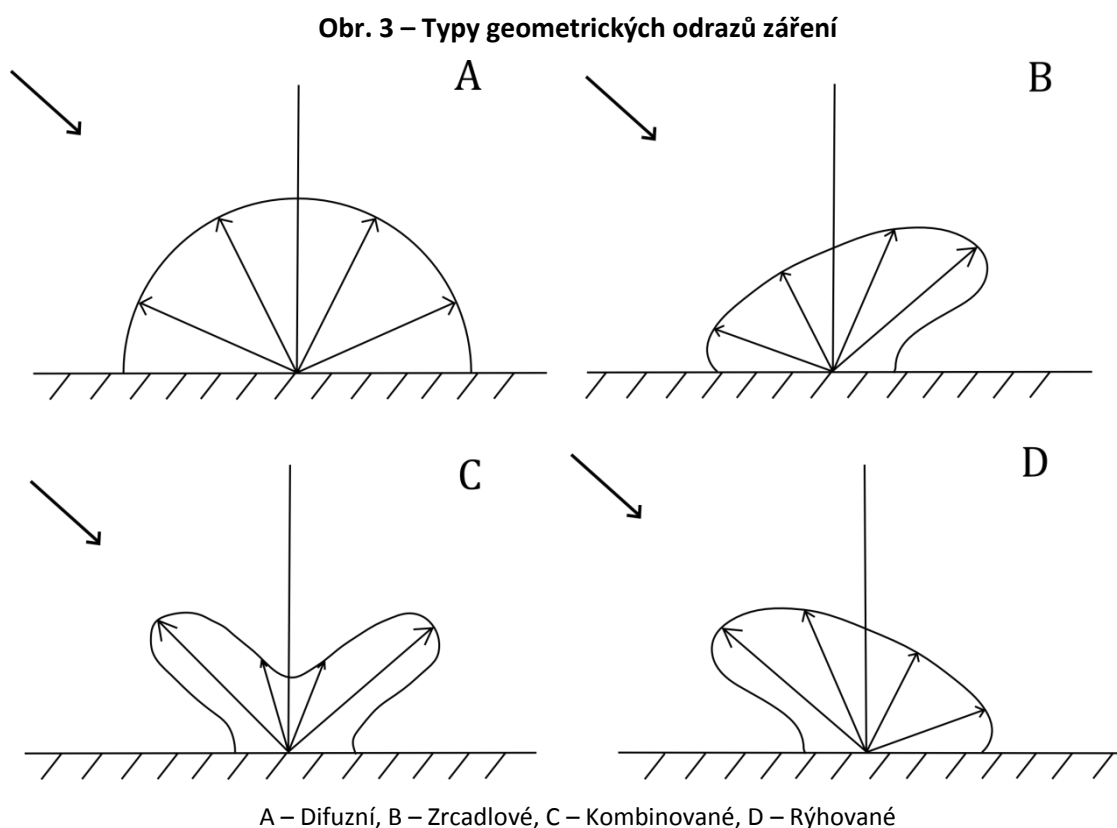
$$\lambda \geq 8 h \cos \theta$$

kde h je maximální výškový rozdíl nerovností na ploše rozhraní a θ je úhel dopadu. Pokud je tento vztah splněn, je možné povrch prohlásit za hladký a počítat s úhlem odrazu jako úhlem dopadu.

Pokud však toto kritérium splněno není, je pro popis geometrie odrazu využíváno diagramu odrazivosti. Ten vyjadřuje směrovou závislost spektrálního koeficientu záře, kde

pro danou polohu zdroje dopadajícího záření a pro daný azimut odrazové roviny je tento koeficient zobrazován v polárních souřadnicích. (Havelková, Pavelka, 2005)

Rozdělují se čtyři hlavní typy geometrických odrazů, které jsou vidět na Obr. 3. Jedná se o difusní typ (A), tedy situaci, kdy povrch odráží záření do všech směrů stejně. Koeficient záře je tedy konstantní. Například písek či čerstvý sníh takto odráží ve viditelném spektru. Dalším typem je zrcadlový povrch (B), který má výrazné maximum ve směru úhlu odrazu, který je roven úhlu dopadu. Tímto způsobem, ve viditelném záření, odráží například skalní bloky či led. Třetím typem jsou kombinované povrchy (C). Ty odráží podobně jako zrcadlové povrchy ale druhé maximum mají v protilehlém směru, tedy ve směru dopadu záření. Takto odráží některé zemědělské plodiny. Posledním typem je rýhovaný povrch (D), který má pouze jedno maximum ve směru dopadu záření. To je charakteristické pro různé typy vegetace. (Havelková, Pavelka, 2005)



Zdroj: Kolář, 2011b

2.2 Modely osvětlení

V této části práce budou popsány modely osvětlení, budou porovnány, zhodnoceny a bude vysvětleno, které části jsou pro aplikaci na měsíčním povrchu důležité a které nejsou podstatné.

Intenzita ozařování, a to integrálně nebo pro nějakou specifickou část spektra v konkrétním bodě, je vždy kombinací více faktorů. Aby nebylo nutné hodnotu intenzity ozařování všude měřit, což je pro rozsáhlá území a různá časová rozpětí složité až nemožné, je využíváno modelů, které spočítají odhad. Žádný model osvětlení nedosáhne stejné přesnosti, jako kdyby byla hodnota všude změřena, protože nelze modelovat nespočet okolních objektů, které záření emitují. Vždy se tedy v modelu dopouštíme nějakých zjednodušení. Nicméně je možné vytvořit model, který svou přesností bude dostačující a poskytne tak rámcově správné údaje pro konkrétní úkol.

Pro dosažení relevantního výsledku je třeba dopadající záření rozložit na jednotlivé faktory, které ke konečné hodnotě přispívají a ty jednotlivě spočítat. Pro zemský povrch se dopadající záření nejčastěji rozkládá do tří částí: přímé sluneční záření, difuzní neboli atmosférou rozptýlené a odražené záření. Největším rozdílem mezi aplikací modelu na zemském a měsíčním povrchu jsou optické vlastnosti atmosféry těles. Měsíc sice má tenkou vrstvu atmosféry, ale jak píše Stern (1999), prakticky je ve formě exosféry, ve které chybí optické jevy a kolize částic jsou zde vzácné. Poměrem k Měsíci má Země silnou vrstvu atmosféry, která značně mění intenzitu dopadajícího záření. Proto již z principu jsou největší rozdíly mezi modely na Zemi a na Měsíci v ovlivnění přímého záření atmosférou a v difuzním záření.

a) Model ESRI Solar radiation

Tento model počítá osvětlení krajiny na základě algoritmu, pracujícího s obrazem oblohy a okolních ploch jakožto prostorové hemisféry. Výslednou hodnotu globálního osvětlení počítá jako součet hodnoty přímého a difuzního záření, nezohledňuje tedy záření odražené. (ESRI, 2012a)

Tento model je rozdělen do čtyř kroků. Nejprve je spočítán hemisférický obraz viditelnosti oblohy a okolních ploch. Je to rastrová reprezentace celé oblohy (povrch polokoule), která je viditelná, nebo zahrazena nějakou překážkou, z nějakého konkrétního místa na povrchu. Tento binární rastr je počítán vyhledáváním maximálního úhlu překážky nad obzorem pro daný počet směrů v každé lokaci. Všechny výšky překážek nad obzorem jsou pak přepočítány do hemisférického souřadného systému, takže zobrazují trojrozměrný prostor ve dvourozměrném rastru. Každá buňka rastru pak vypovídá, zda je obloha v daném směru (azimut a zenitový úhel) viditelná, nebo zastíněna překážkou. (ESRI, 2012a)

V dalším kroku je počítána tzv. sluneční mapa. Ta zobrazuje směr přímého slunečního záření pro zvolené časové období ve stejném souřadném systému jako rastr

viditelnosti oblohy. Je to rastr reprezentující zdánlivý pohyb Slunce po obloze. Je závislý na zeměpisné šířce lokace a vybraném časovém období. (ESRI, 2012a)

Dále je spočítána mapa difuzního záření. To přichází ze všech směrů jako důsledek rozptylu světla v atmosféře. Je vytvořena mapa oblohy, opět ve stejném hemisférickém souřadném systému, která je rozdělena do určitého počtu částí, které jsou definovány zenitovým úhlem a azimutem. (ESRI, 2012a)

Oba rastry jsou potom „oříznuty“ rastrem viditelnosti oblohy, tak aby bylo počítáno pouze s těmi sektory oblohy, které jsou z daného místa viditelné. Hodnota celkového dopadajícího přímého záření je vypočítána jako součet všech hodnot za všechny sektory oblohy. Pro jeden sektor lze hodnotu vypočítat ze součinu solární konstanty, hodnoty propustnosti atmosféry, doby trvání osvětlení (ta je daná velikostí sektoru oblohy) a cosinem zenitového úhlu centroidu sektoru. (ESRI, 2012a)

Difuzní záření je pak podobně počítáno jako suma hodnot za jednotlivé sektory. Tu lze spočítat součinem hodnot globálního normálního záření (množství přímého záření, které je rozptýleno v závislosti na hodnotě propustnosti atmosféry a oblačnosti), časového rozpětí analýzy, velikostí daného sektoru a cosinem zenitového úhlu centroidu sektoru. Výslednou hodnotou je pak součet hodnot přímého a difuzního záření. (ESRI, 2012a)

Co se týká možné aplikace pro povrch Měsíce, je využití hemisférických rastrů použitelné stejně dobře jako na Zemi a model by byl zjednodušen o vlivy atmosféry ve vzorcích (propustnost atmosféry, koeficient oblačnosti a celý výpočet difuzního záření). Na druhou stranu model zanedbává řešení odraženého záření.

b) Model r.sun

Model r.sun je plně implementován v open source softwaru GRASS GIS. Počítá přímé i difuzní záření, a na rozdíl od předchozího modelu i záření odražené. Je také zahrnut efekt stínu okolních objektů a to buď přímo počítáním stínu z digitálního modelu anebo využitím rastru *výšek horizontu* což je výpočetně rychlejší. Model nebere v úvahu prostorové a časové změny oblačnosti, ale počítá s podmínkami pro jasnou oblohu. Program počítá buď hodnotu osvětlení v daném čase, nebo sumy za delší časový úsek. (GRASS GIS, 2013)

Hodnota globálního ozáření je vypočítána jako součet všech tří výše zmíněných složek. Ve výpočtu přímého slunečního záření je nejprve opravována hodnota solární konstanty o rozdíly během roku vlivem nerovnoměrného oběhu Země kolem Slunce. Dále je tato hodnota upravena změnami při průchodu atmosférou, a to s využitím Linkeho

atmosférické turbidity a relativní optické hmoty vzduchu. Nakonec je hodnota upravena ve vztahu ke sklonu povrchu vůči směru osvitů Slunce. (Hofierka, Šúri, 2002)

Hodnota difuzního záření se zvyšuje s přibývajícím oblačností a se zvyšujícím se znečištěním atmosféry a s tím i klesá hodnota přímého záření. Hodnota difuzního záření v modelu r_{sun} je počítána úpravou hodnoty dopadajícího záření nad atmosférou (upravené solární konstanty) o difuzní přenosovou funkci atmosféry závislou na Linkeho faktoru turbidity a o vliv výšky Slunce nad obzorem. Výsledkem je odhad difuzního osvětlení na horizontální ploše se sluncem v nadhlavníku. Nakonec je tato hodnota upravena, aby odpovídala ukloněnému povrchu. (Hofierka, Šúri, 2002)

Výpočet odraženého záření od okolního povrchu je založen na předpokladu, že odražené záření je přímo úměrné hodnotě dopadajícího záření na okolí (přímé + rozptýlené), průměrnému albedu okolí a podílu viditelných ploch z ukloněného povrchu. (Hofierka, Šúri, 2002)

Využití modelu pro povrch Měsíce vyžaduje jisté úpravy, a to samozřejmě vynechání modelování atmosféry a difuzního záření. Nicméně výpočet odraženého záření je dobře použitelný i pro těleso bez atmosféry a při znalosti albeda lunárního regolitu může přispět ke zpřesnění modelování osvětlení.

c) Model ASHRAE

Model ASHRAE je široce využíván architekty a inženýry pro výpočet osvětlení. Počítá se všemi třemi složkami osvětlení. Bere v potaz změny vzdálenosti mezi Zemí a Sluncem a upravuje dle toho hodnotu solární konstanty. Při výpočtu přímého slunečního záření model počítá s ukazatelem vlhkosti ovzduší v měřeném místě, s atmosférickým tlakem a samozřejmě počítá s opravou náklonu povrchu vůči dopadajícím paprskům. Výpočet difuzního záření je založen na tabelované hodnotě C . Ta byla empiricky změřena jako poměr intenzity záření dopadající na jednotku plochy při zastínění oblaky a intenzity záření dopadající na jednotku plochy při jasném dni. Hodnota difuzního záření je následně upravena faktorem zohledňujícím úklon povrchu.

Výpočet odraženého záření používá stejné vzorce jako v modelu r_{sun} . Je zde využito odrazivosti okolního povrchu, celkového množství dopadajícího záření a faktoru úklonu plochy.

Jako v předchozích případech je použití na povrchu Měsíce možné, po upravení vzorců pro nulovou atmosféru a vynechání difuzního záření. Jelikož se model ASHRAE a

r.sun liší pouze v modelování změny intenzity ozáření při průchodu atmosférou, při aplikaci na měsíčním povrchu by byly tyto dva modely totožné.

d) Teoretický model osvětlení Měsíce Li a kol.

Na rozdíl od předchozích modelů je tento model teoretický a je zaměřen přímo na výpočet intenzity osvětlení na Měsíci. Počítá přímo s dynamikou pohybu Měsíce v soustavě Měsíc-Země-Slunce a z toho odvozuje velikost solární konstanty v příslušném čase. Protože je zaměřen přímo na Měsíc, neřeší žádné vlivy atmosféry, difuzní záření, ale nezohledňuje ani záření odražené. Bere v úvahu teoretický vliv topografie na hodnotu intenzity osvětlení, ale praktické řešení tohoto problému, na rozdíl od předchozích GIS modelů, postrádá.

Li a kol. (2012) spočítali, že v limitních podmínkách perihelia, perigea, afélie a apogea se hodnoty solární konstanty nad lunárním rovníkem liší o více než 100 W/m^2 , a proto bylo nutné zohlednit dynamiku změn solární konstanty v závislosti na vzdálenosti Měsíc-Slunce. Model zavádí dvě důležité proměnné, a to ozářenost měsíčního povrchu (Lunar-surface solar irradiance – LSI) a efektivní ozářenost měsíčního povrchu (Lunar-surface effective solar irradiance – LESI), která je ve směru normály povrchu. K přepočtu mezi těmito hodnotami je využito kosinu úhlu dopadajícího záření. LSI je pak počítána pomocí poměru aktuální vzdálenosti Slunce-Měsíc a střední hodnoty této vzdálenosti.

Dále je v modelu vyjádřena vzdálenost Slunce-Měsíc pomocí vzdálenosti Země-Měsíc, úhlu Měsíc-Země-rovina ekliptiky a úhlu Měsíc-Slunce-rovina ekliptiky. Nicméně toto vyjádření je možná v praktických použitích zbytečné, protože hodnoty vzdálenosti Slunce-Měsíc lze získat přímo, a to prostřednictvím webového rozhraní aplikace *Horizons* z dílny *Jet Propulsion Laboratory NASA*. (NASA, 2013) Vyjádřený vzorec je však dále zjednodušen předpokladem, že úhel Měsíc-Země-rovina ekliptiky je velmi malý ($0 - 5.15^\circ$), a proto lze vyjádřený výraz nahradit limitou, pro úhel jdoucí nule. Následný výraz je pak velmi zjednodušen a hodnota LESI je závislá pouze na Solární konstantě, kosinu úhlu dopadu slunečních paprsků a druhé mocnině vzdálenosti Země-Slunce.

Dále je počítán úhel dopadu paprsků. Zde je počítáno se selenografickými souřadnicemi subsolárního bodu (bodu, na který svítí Slunce kolmo v daném čase, také obsažený v systému *Horizons*), selenografickými souřadnicemi měřeného bodu, vzdáleností Měsíc-Slunce a poloměrem Měsíce. Jedná se o výpočty na sféře.

Při řešení vlivu topografie na osvětlení Li a kol. (2012) uvádí velikost okolí, pro které je nutné počítat s vlivem členitosti okolního reliéfu. Tato hodnota byla odvozena z nejvyššího a nejnižšího naměřeného místa na povrchu Měsíce a pohybuje se okolo 240

km. Nicméně statistická analýza ukázala, že největší rozdíly v okruhu 240 km jsou menší, proto lze počítat pouze s okolím asi 180 km. Dále je diskutován vliv velikosti slunečního disku na výsledek. Vliv topografie je pak uveden pouze teoreticky, a to navržením vzorce pro výpočet kritické elevace v místě o určité vzdálenosti. (Li ... [et al.], 2012)

V praxi by to znamenalo spočítat a porovnat kritické elevace ve všech mezilehlých bodech ve směru svitu slunce, což je pro oblast 180 km velmi náročný úkon. Geoinformační systémy nabízejí jednodušší řešení s využitím digitálního modelu terénu. Model také vůbec neuvažuje odražené záření.

Li a kol. (2012) svůj model zalgoritmovali v jazyce C++ nad operačním systémem Linux, ale kód nezpřístupnili veřejnosti. Zkoumali však pouze veličinu LESI nad plochým povrchem. Jedná se tedy o teoretickou aplikaci modelu bez vlivu členitosti reliéfu, který je však pro reálný výpočet osvětlení v konkrétním bodě zcela zásadní. Jejich hlavním cílem bylo zjistit změnu LESI jen v závislosti na čase a selenografické šířce, a to v průběhu roku a následně i 18,6-ti letého cyklu Měsíce.

2.3 Výběr modelu a cíle práce

V práci Li a kol. (2012) je vytvořen teoretický fyzikální předpis, který popisuje dopadající záření na povrch Měsíce aproximovaného koulí v čase. Avšak pro praktické využití je třeba aproximaci koulí nahradit reálným modelem terénu a zahrnout vliv zastínění okolním reliéfem.

Jako model byl vybrán teoretický model Li a kol. (2012), který bude, jak stanovují další cíle práce, rozšířen o další faktory. Vybrán byl především pro jeho specializaci přímo na povrch Měsíce na rozdíl od ostatních rozebíraných modelů, které se zaměřují na Zemi. Jedním z cílů práce je tak jeho implementace v prostředí geoinformačního systému nad dostupnými daty a vytvoření vlastního postupu pro posouzení zastínění měřeného bodu okolním reliéfem.

Dalším cílem práce je vypočítat intenzitu ozařování jednotlivými zdroji záření a na základě velikosti této intenzity posoudit, zda budou do modelu zahrnuty. U záření ze Slunce bude vytvořen postup pro výpočet intenzity ozařování, který bude brát v potaz proměnlivou vzdálenost mezi Měsícem a Sluncem. Dále budou diskutovány jiné zdroje než Slunce, zejména záření ze Země a záření od Země odražené, a tyto zdroje budou případně do modelu zahrnuty.

Jedním z dalších cílů je vytvoření nového postupu pro výpočet odraženého záření na měsíčním povrchu. Některé rozebírané modely, které byly popsány v předchozí

kapitole, odražené záření úplně zanedbávají či neřeší, jiné ho do výpočtu zahrnují. V této práci bude vytvořen a podrobně rozepsán postup výpočtu odraženého záření, který se opírá o geometrické prostorové vztahy modelovaných ploch.

Jedním z vedlejších cílů bude zpracování a uložení dat ze systému *JPL Horizons* tak, aby bylo dosaženo efektivního načítání těchto dat v průběhu vykonávání výsledného programu.

Finálním výstupem této práce bude spustitelný skript v prostředí geoinformačního programu *ArcGIS*, který bude počítat intenzitu ozařování ve zvoleném místě a čase na základě vložených vstupních dat. Ta budou v práci rozebrána a v rámci algoritmu budou provedeny systematické úpravy těchto dat, jako je filtrace či oprava výšek povrchu, které budou v práci teoreticky popsány. Jednotlivé části programu budou následně otestovány a v práci bude zhodnocena funkčnost a případné nedostatky konečného modelu.

3. Metodika

V této kapitole je teoreticky rozebrán princip výpočtu intenzity ozařování v konkrétním místě na měsíčním povrchu. Nejprve je stanoven význam jednotlivých zdrojů záření a je rozhodnuto, které budou zahrnuty do analýzy. U těch je pak rozebrána jejich geometrická reprezentace. Dále je zhodnoceno odražené záření, přepočteno odrazivosti regolitu z infračerveného do viditelného spektra a je popsán nově vytvořený postup pro výpočet odraženého záření. V poslední části je pak teoreticky popsáno, jak model počítá zastínění okolním reliéfem a také výpočet intenzity ozařování přímého slunečního záření.

3.1 Zdroje záření

Zdrojů, ze kterých dopadá záření na měřený povrch na Měsíci, je velmi mnoho, protože se jedná o všechny okolní objekty, tedy planety, asteroidy, hvězdy, galaxie, či samotné okolní plochy měsíčního povrchu. Není možné do modelu zahrnout všechny, ale je třeba posoudit jejich význam a poté rozhodnout, zda budou do modelu zahrnuty, či nikoliv.

Intenzita ozařování, která pochází z jednoho zdroje, je závislá na teplotě, velikosti a vzdálenosti tohoto zdroje. Nejteplejším a největším objektem ve sluneční soustavě je Slunce, a proto je třeba vypočítat, či změřit jaká je intenzita ozařování z tohoto zdroje ve vzdálenosti, ve které se nachází Země, respektive Měsíc. Tento údaj se nazývá „solární konstanta“ a první měření probíhala např. Charlesem Greeley Abootem už od počátku 20. století (Devorkin, 1998). Přesněji však byla změřena až s použitím satelitů nad hranicí atmosféry.

a) Výpočet solární konstanty

Termín konstanta je z teoretického pohledu nesprávný, protože hodnota není na Zemi ani na Měsíci v čase konstantní, ale je závislá především na vzdálenosti od zdroje, tedy Slunce, a ta se v průběhu roku mění. Nicméně z praktického důvodu, zejména kvůli zaběhlosti výrazu, bude termín „solární konstanta“ v této práci použit pro intenzitu dopadajícího slunečního záření na hranici atmosféry u Země či na povrch v případě Měsíce, ač se bude v různých časech jednat o rozdílnou, tedy nekonstantní hodnotu.

Kromě vzdálenosti ovlivňují solární konstantu také změny vyzařování Slunce způsobené událostmi na Slunci, jako jsou například sluneční erupce či sluneční skvrny.

Takovéto události však nelze předem předvídat, a je třeba tedy počítat s možnou odchylkou při těchto dočasných událostech.

Slunce se svým zářením velmi podobá záření černého tělesa s povrchovou teplotou 6000K, ale liší se v oblasti ultrafialového spektra, pro které se využívá spíše povrchová teplota 4500K, a částečně i v oblasti viditelného spektra. Pro výpočet solární konstanty v této práci byla využita reálná hodnota povrchové teploty Slunce 5777 K (NASA, 2014d). Ze Stefan-Boltzmannova zákona lze vypočítat intenzitu vyzařování pro tuto teplotu na jednotku jednoho metru čtverečního.

$$M = \sigma T^4 \quad (3.1.1)$$

$$M_S = 5,6704 * 10^{-8} * 5777^4$$

$$M_S = 63\,157\,243,4 \text{ Wm}^{-2}$$

Spočítaná hodnota je intenzita vyzařování na povrchu Slunce. Pro získání intenzity ozařování je třeba vzít v potaz vzdálenost, ve které se od Slunce nachází Země. K přepočtu bylo jako mezikrok vypočítáno celkové množství energie za jednotku času, které Slunce vyžáří do okolí svou plochou. Jedná se tedy o zářivý tok a výsledné číslo je v Joulech za sekundu, tedy ve Watech. Slunce má poloměr 695 508 km (NASA, 2014d).

$$\Phi_S = M_S S_S \quad (3.1.2)$$

$$S_S = 4 \pi r_S^2$$

$$S_S = 6,078747775 * 10^{18}$$

$$\Phi_S = 63\,157\,243,4 * 6,078747775 * 10^{18}$$

$$\Phi_S = 3,839 * 10^{26}$$

kde Φ_S je zářivý tok z povrchu Slunce, S_S je povrch Slunce a r_S je poloměr Slunce.

Pro získání solární konstanty je třeba vypočítat intenzitu ozařování dopadající na jeden metr čtvereční ve vzdálenosti Země – Slunce. Ta je v tomto případě nahrazena 1AU (astronomickou jednotkou), čili průměrnou vzdáleností Země od Slunce. Ve výsledném algoritmu je počítána dle zadaného data a hodiny v přesné vzdálenosti Měsíce od Slunce. Nejprve je vypočten povrch koule s poloměrem vzdálenosti Země – Slunce a následně je vypočtena intenzita ozařování této koule při zachovaném zářivém toku Slunce. Zde je využit předpoklad, že v téměř dokonalém vakuu vesmíru nedochází k interakcím záření s částicemi, a hodnota tak klesá pouze přímo úměrně druhé mocnině vzdálenosti.

$$S_{SE} = 4 \pi r_{SE}^2 \quad (3.1.3)$$

$$S_{SE} = 4 * 3,14 * 149\,597\,871\,000^2$$

$$S_{SE} = 2,812 * 10^{23}$$

$$k = \frac{\Phi_S}{S_{SE}}$$

$$k = \frac{3,839 * 10^{26}}{2,812 * 10^{23}}$$

$$k = 1\,365,2 \text{ Wm}^{-2}$$

kde S_{SE} je povrch koule s poloměrem r_{SE} tedy vzdálenosti Slunce – Země a k je výsledná solární konstanta.

b) Záření emitované Zemí, planetami a vzdálenými hvězdami

Před tím, než budou rozebírány různé faktory ovlivňující intenzitu ozařování na Měsíci, je třeba stanovit, jaké zdroje záření budou do analýzy zahrnuty. Primárním zdrojem záření ve sluneční soustavě je Slunce, protože je to největší a nejteplejší objekt v této soustavě. Ale jak již bylo rozebíráno v minulých kapitolách, zdrojů záření, které přispívají k celkové hodnotě intenzity ozařování, je mnoho.

V této části tak bude vypočten a zhodnocen vliv druhého nejsvětivějšího objektu na měsíční obloze, a tím je Země. Záření od Země lze rozdělit na dva typy a to samotné záření emitované Zemí a dále záření sluneční od Země pouze odražené.

Maximum záření je u Země vyzařováno na delší vlnové délce než u Slunce, protože Země má nižší povrchovou teplotu. To lze vypočítat z Wienova posunovacího zákona:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \tag{3.1.4}$$

$$\lambda_{E\,max} = \frac{2,898 * 10^{-3}}{288}$$

$$\lambda_{E\,max} = 10 \mu\text{m}$$

Záření emitované Zemí lze vypočítat skoro stejně jako solární konstantu s opravou o funkci atmosféry Země. Ze Stefanova-Boltzmannova zákona je vypočítána intenzita vyzařování, při průměrné teplotě Země 15 C° tedy 288K. Dále je třeba hodnotu opravit o absorpci atmosféry.

Záření je s vlnovou délkou 10 μm v oblasti infračerveného záření a značná část je pohlcena atmosférou. Celkem je povrchem vyzařeno 492 Wm^{-2} , ale rovných 452 Wm^{-2} atmosféra pohltí. Nicméně je nutné brát v potaz ještě záření, které emituje samotná atmosféra. To dává v kombinaci se zářením atmosférou prošlým asi 235 Wm^{-2} , z čehož 40 Wm^{-2} je záření atmosférou prošlé a 195 Wm^{-2} je záření atmosférou emitované. (Kolář, 2013)

Následně je třeba spočítat zářivý tok z povrchu a atmosféry Země podobně jako u solární konstanty a přepočítat ho na jednotku plochy v průměrné vzdálenosti povrchů

Měsíce a Země. Ta činí po odečtení poloměru Země (6371 km) a Měsíce (1737 km) od průměrné vzdálenosti středů obou těles, kterou NASA (2014e) uvádí na 384 400 km, asi 376 292 km:

$$S_E = 510 * 10^{14} \text{ m}^2 \quad (3.1.5)$$

$$P_E = 235 * 510 * 10^{14}$$

$$P_E = 1,199 * 10^{17}$$

$$S_{EM} = 4 \pi r_{EM}^2$$

$$S_{EM} = 4 * 3,14 * 376 292 000^2$$

$$S_{EM} = 1,779 * 10^{18}$$

$$k_E = \frac{P_S}{S_{EM}}$$

$$k_E = \frac{1,199 * 10^{17}}{1,779 * 10^{18}}$$

$$k_E = 0,067 \text{ Wm}^{-2}$$

Jak je vidět, intenzita ozařování Zemí je na povrchu Měsíce oproti intenzitě ozařování Sluncem o více než čtyři řády menší, a proto nebyla do analýzy zahrnuta. Je třeba ještě zdůraznit fakt, že se jedná z velké části o záření v infračerveném spektru, a tedy pro lidské oko neviditelné, ale i nevhodné pro využití například ve fotovoltaice, protože mezní vlnová délka pro fotovoltaický jev je na křemíku méně než 1 μm (ČEZ, 2014). Ze stejného důvodu byly zanedbány okolní plochy Měsíce a také ostatní planety. Ty mají všechny až na Venuši a Merkur průměrnou povrchovou teplotu menší než Země a většina jimi emitovaného záření je tedy v delších vlnových délkách než ve viditelném spektru. Venuše a Merkur jsou ale zase oba menší než Země a od Měsíce podstatně vzdálenější, takže intenzita ozařování z těchto planet, ač v trochu kratších vlnových délkách, bude ještě méně významná než u Země.

Záření hvězd mimo sluneční soustavu však svojí vlnovou délkou odpovídá viditelnému spektru, proto je třeba rámcově stanovit hodnotu ozařování z těchto zdrojů. Jako příklad bude uvedena nejjasnější hvězda na noční obloze, tedy dvojhvězda Sirius. Ta se skládá z hlavní hvězdy tzv. Sirius A a z bílého trpaslíka obíhajícího kolem této hvězdy tzv. Sirius B, který, zejména kvůli své velikosti, není z hlediska vyzařování tak podstatný. Sirius A má poloměr 1,711 poloměru Slunce (Liebert ... [et al.], 2005), jeho teplota je 9940 K (Adelman, 2004) a je vzdálený 8.6 světelného roku. Při podobném výpočtu jako u solární konstanty dostaneme z těchto dat hodnotu intenzity ozařování $1,18 * 10^{-7}$, tedy hodnotu o 11 řádů menší než intenzita ozařování Sluncem. Kvůli takto nízké intenzitě ozařování bylo rozhodnuto, že kromě Slunce nebudou do analýzy zařazeny žádné další hvězdy.

c) Sluneční záření odražené od Země

Druhým typem záření od Země je sluneční záření, které se odrazí od povrchu či atmosféry. Odrazivost Země je prostorově proměnlivá a je závislá především na množství oblačnosti. Ta patří mezi dobré odražeče podobně jako např. sníh či suchý písek. Naopak voda a vegetace velmi dobře absorbují záření a hodnotu odrazivosti mají i pod 10 %. Odrazivost atmosféry ale nelze dlouhodobě dopředu odhadovat, proto se využívá průměrného albeda Země α_E 0,31 (Manley, Reynolds, 2010).

Pro odhad maximální intenzity odraženého záření je třeba spočítat celkové množství záření, které dopadne na polokouli Země (případ zemského úplňku z pohledu Měsíce), vynásobit tuto hodnotu průměrným albedem Země a stejně jako při výpočtu solární konstanty zjistit intenzitu ozařování ve vzdálenosti Země – Měsíc.

Pro výpočet je využita hodnota vypočtené solární konstanty k a povrchu Země S_E ze vzorce 3.1.3 a průměrná vzdálenost Země – Měsíc r_{EM} ze vzorce 3.1.5.

$$R_{SE} = k \alpha_E \frac{S_E}{2} \quad (3.1.6)$$

$$R_{SE} = 1365,2 * 0,31 * 510 * 10^{14} * 0,5$$

$$R_{SE} = 1,079 * 10^{19}$$

$$k_{SE} = \frac{R_{SE}}{2 \pi r_{EM}^2}$$

$$k_{SE} = 12,12 \text{ W m}^{-2}$$

Jak je vidět, odražené sluneční záření od Země je již podstatně vyšší než záření Zemí emitované, ale je stále asi 100 krát méně významné než samotné přímé sluneční záření. Mnohem více významná je například fluktuace solární konstanty v závislosti na vzdálenosti Země – Slunce, kde rozdíl mezi krajními hodnotami přesahuje 100 W m^{-2} (Li ... [et al.], 2012). Protože intenzita ozařování odraženým zářením od Země nedosahuje ani 1% přímého slunečního záření a protože se jedná o maximální možnou intenzitu, takže většinou bude význam ještě menší, bylo rozhodnuto odražené sluneční záření od Země do analýzy nezahrnout.

d) Reprezentace zdroje záření

Poloha Slunce oproti měřenému povrchu je bezesporu klíčová. Některé jednodušší modely aproximují Slunce bodem v nekonečnu. Jiné počítají i s konečnou vzdáleností mezi měřeným bodem a zdrojem záření. Avšak důležité také je, jakým tvarem je Slunce v modelu reprezentováno, zda bodem či plochou.

Už při letném pohledu na oblohu je zřejmé, že Slunce při pohledu ze Země lze vnímat spíše jako kruhovou plochu než jako bod, kterým se jeví například vzdálené hvězdy, ač ani ty nejsou bezrozměrné.

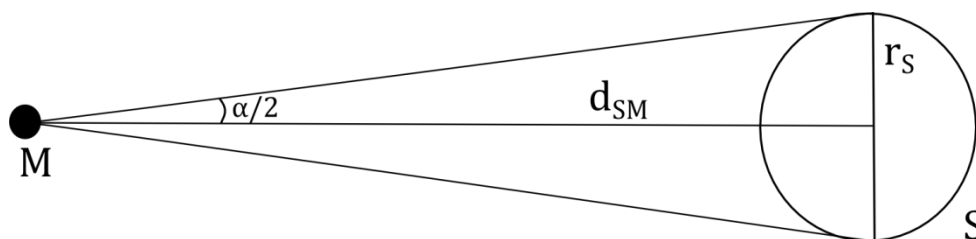
Pokud je celý kotouč viditelný, nebo naopak zcela zastíněný, na reprezentaci nezáleží a výsledky pro reprezentaci plochou i bodem budou totožné. Ale pokud bude část slunečního kotouče zastíněna a současně část viditelná, na měřený bod dopadne pouze viditelné ploše úměrná část přímého záření. Pokud by byl zdroj, tedy Slunce, reprezentován bodem, k částečnému zastínění by nikdy nemohlo dojít. Existovaly by tak pouze dvě možnosti, a to úplně osvětlen, či úplně zastíněn.

Při implementaci na Měsíci je tato problematika poměrně významná. Jedním důvodem je dlouhá doba otočení Měsíce kolem své vlastní osy v kombinaci s malým úhlem sklonu této osy k rovině ekliptiky. Měsíc se otáčí asi 27krát pomaleji než Země (NASA, 2014e), takže při západu Slunce zůstává znatelně delší dobu blízko horizontu, a částečné zastínění tak trvá delší dobu než například na Zemi. Důležitá je také selenografická šířka měřeného místa. Na pólech, které jsou diskutovány jako vhodná místa pro vystavění lunární základny, Slunce nikdy nevystoupá nebo neklesne výše respektive níže než $1,5^\circ$ nad či pod horizont. Protože sluneční kotouč, jak je vypočítáno níže v rovnici 3.1.7, má průměr asi $0,5^\circ$, bude v těchto lokalitách docházet k částečným zastíněním poměrně často a po dlouhou dobu.

Měsíc také nemá atmosféru, jak již bylo psáno v kapitole 2.2, a chybí zde tedy optické jevy zejména difuze záření atmosférou. Na Zemi je velké množství záření pohlceno atmosférou, která při zastínění přímého slunečního záření poskytuje jiný zdroj, a tak je například i pod oblačností, nebo v zákrytu stále dostatečné množství světla kupříkladu pro lidské oko. Pokud tedy dojde k částečnému zastínění slunečního kotouče na Zemi, procentuální úbytek celkové intenzity ozařování není tak vysoký jako při částečném zastínění na Měsíci, kde difuzní záření chybí.

Zanedbání velikosti slunečního disku by mohlo v některých lokalitách podstatně zkreslit výslednou intenzitu ozařování, a proto je v této práci s tímto faktorem počítáno. Je třeba zjistit, jak je při pohledu z Měsíce sluneční kotouč veliký a zda je významná jeho změna v závislosti na vzájemné poloze Měsíce a Slunce. Proto je níže v rovnici 3.1.7 vypočtena velikost kotouče v aféliu a perihéliu, dle závislosti na vzdálenosti a poloměru Slunce, jak je vidět na Obr. 4.

Obr. 4 – Úhlová velikost slunečního kotouče



Z nákresu je patrné, že úhlová velikost Slunce (α) je vypočtena jako dvojnásobek úhlové velikosti dané funkcí tangens z poměru poloměru (r_S) a vzdálenosti Slunce (d_{SM}). Afélium Měsíce (d_{SMmax}) je součet apogea Měsíce (d_{EMmax}) a afélie Země (d_{SEmax}) a perihélium Měsíce (d_{SMmin}) je rozdíl perihélie Země (d_{SEmin}) a apogea Měsíce (d_{EMmax}). Tyto hodnoty byly odečteny z NASA 2014a, NASA 2014e a NASA 2014d. Největší úhlovou velikost (α_{max}) bude mít kotouč, když bude měsíc v perihéliu a naopak nejmenší velikost (α_{min}) bude mít v aféliu.

$$d_{SEmax} = 152\,098\,233\text{ km} \quad (3.1.7)$$

$$d_{SEmin} = 147\,098\,291\text{ km}$$

$$d_{EMmax} = 405\,696\text{ km}$$

$$d_{SMmax} = d_{SEmax} + d_{EMmax} = 152\,503\,929\text{ km}$$

$$d_{SMmin} = d_{SEmin} - d_{EMmax} = 146\,692\,595\text{ km}$$

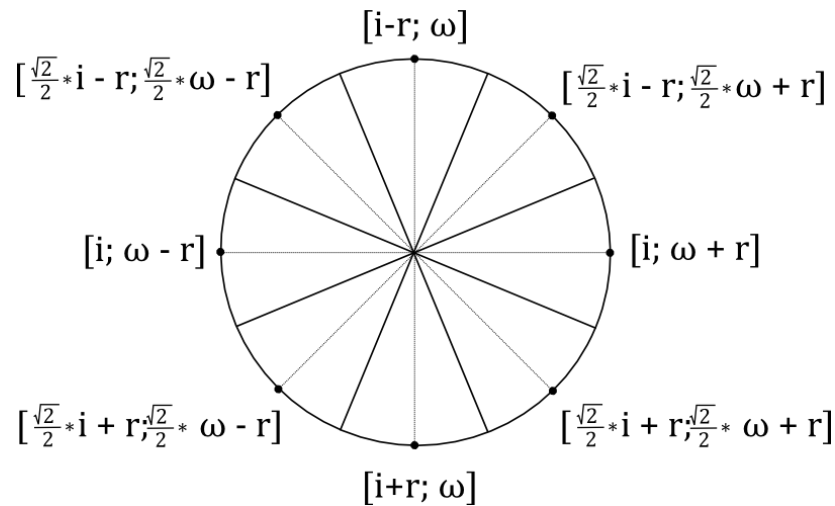
$$r_S = 695\,508\text{ km}$$

$$\alpha_{max} = 2 * \arctan\left(\frac{r_S}{d_{SMmin}}\right) = 0^\circ 32' 36''$$

$$\alpha_{min} = 2 * \arctan\left(\frac{r_S}{d_{SMmax}}\right) = 0^\circ 31' 21''$$

Jak je vidět, hodnoty úhlové velikosti slunečního kotouče se v závislosti na vzdálenosti, tedy v čase, změní maximálně o $1' 15''$, což je asi 2% odchylka od průměru, a je proto možné sluneční kotouč aproximovat kruhem o středním průměru $0^\circ 32'$.

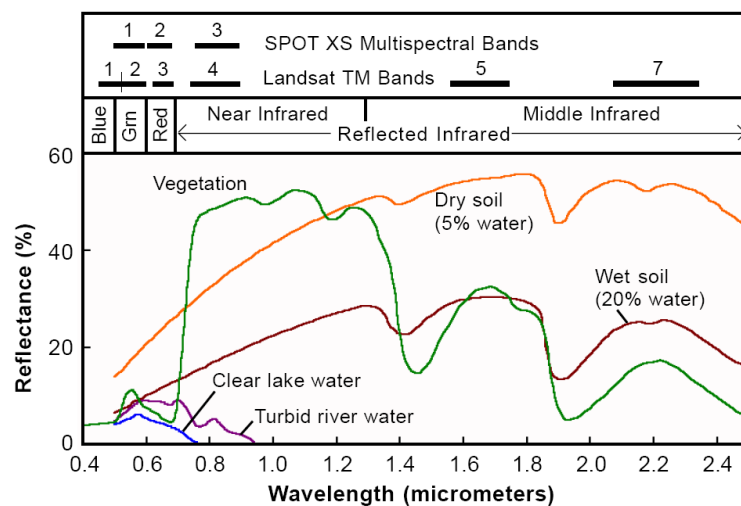
Aby bylo možné počítat s částečným zastíněním, je kotouč rozdělen na několik částí. Protože ve výsledném modelu je viditelnost Slunce reprezentována liniemi viditelnosti, které se následně protínají s digitálním modelem terénu, jak je blíže popsáno v kapitole 3.3, je každá část rozděleného slunečního kotouče reprezentována jednou linií. Schéma rozdělení kotouče i s úhlovými odchylkami azimutu (ω) a doplnku výšky Slunce nad obzorem (i) jednotlivých bodů od středu slunečního kotouče jsou znázorněny na Obr. 5, kde r představuje úhlový poloměr slunečního kotouče, tedy $0^\circ 16'$. Pokud je zastíněna konkrétní linie, je počítáno se zastíněním celé plochy, kterou reprezentuje.

Obr. 5 – Rozdělení slunečního kotouče

3.2 Odražené záření

Jak bylo uvedeno v kapitole 2.1, každé těleso vyzařuje určité množství záření v závislosti na své teplotě a emisivitě. Následně se toto záření šíří prostorem a může dopadnout na povrch jiného tělesa. Toto těleso pak část záření pohltí a část odrazí v závislosti na elektromagnetických vlastnostech těchto dvou prostředí.

Odrazivost, stejně jako další radiometrické veličiny, se mění také s vlnovou délkou záření, proto se určuje vždy spektrálně. Pokud se tato veličina vynese do grafu v závislosti na vlnové délce, vznikne spektrální křivka odrazivosti. Pomocí ní lze rozlišovat jednotlivé typy povrchů, jak je vidět na Obr. 6. Spektrální křivky odrazivosti se využívají především v dálkovém průzkumu Země.

Obr. 6 – Spektrální křivky odrazivosti

Zdroj: Červená, 2013

V této práci byly využity spektrální křivky lunárního regolitu pro přepočítání hodnoty odrazivosti z infračerveného spektra do viditelného, aby bylo možné použít hodnoty odrazivosti laserového paprsku pro odrazivost ve viditelném spektru a dále s touto hodnotou pracovat ve výpočtu odraženého záření. Podrobněji je tato tematika rozebrána v kapitole 3.2b).

Pro modelování odraženého záření je důležitá i další vlastnost odrazu – tou je směr, kterým se dopadající záření odrazí. Intenzita vyzařování odraženého záření je proměnná s typem povrchu, ale i s úhlem, pod kterým záření dopadá a pod kterým je měřeno. Typy geometrie odrazu byly popsány v kapitole 2.1.

V této práci byl využit zjednodušující předpoklad, a to, že odraz je difuzní nezávisle na úhlu dopadajícího záření a záření, se tak z odraženého bodu šíří izotropně, tedy ve všech směrech stejně. Tento předpoklad se v modelech, které nezanedbávají odražené záření (např. r.sun, ASHRAE), velmi často využívá.

Ve skutečnosti se záření může odrazit i vícekrát po sobě, protože i část dopadajícího odraženého záření se znovu odrazí, avšak každý další odraz je méně významný. Při průměrné odrazivosti měsíčního povrchu 0,11 intenzita ozáření klesá s každým odrazem o skoro jeden řád (viz rovnice 3.2.1). V této práci je brán v potaz pouze jeden odraz, a je tedy nutné připustit určité zkreslení.

$$0,11 * 0,11 = 0,0121 \quad (3.2.1)$$

$$0,11 * 0,11 * 0,11 = 0,001331$$

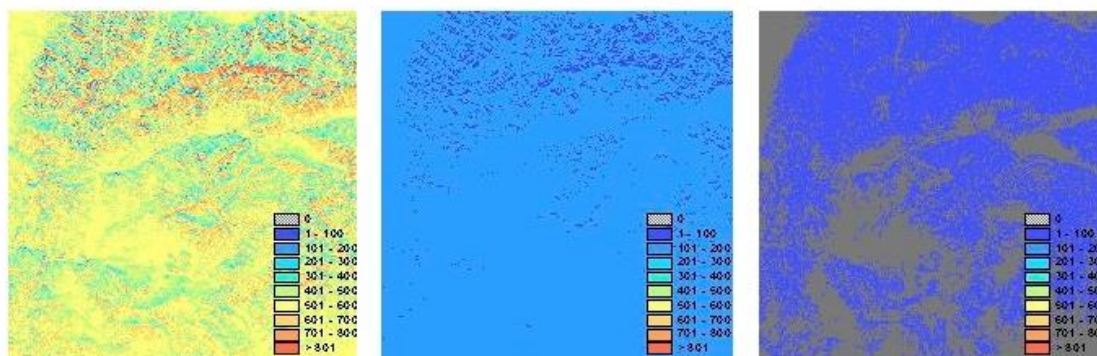
a) Odražené záření v současných modelech

Jak bylo psáno v kapitole 2.2, sluneční záření se rozkládá nejčastěji na záření přímé, difuzní a odražené. Na Zemi je odražené záření z těchto tří částí většinou nejmenší a některé modely (např. ESRI Solar radiation) ho proto úplně zanedbávají. Na Obr. 7 je vidět srovnání velikosti jednotlivých složek záření na výsledku z modelu r.sun. Je to ukázáno na příkladu území Slovenska 21. března ve 12 hodin. Na obrázku jsou složky rozděleny na přímé sluneční záření vlevo, difuzní uprostřed a odražené vpravo. Legenda je pro všechny tři stejná: šedivou barvou je zobrazena nulová intenzita ozáření a následně v odstínech od tmavě modré přes žlutou k červené vždy po 100 W/m² je rozlišeno celkem 9 kategorií (Hofierka, Šúri, 2002).

Přímé záření se liší v závislosti na orientaci svahu, kdy na přivrácených stranách dosahuje hodnot i přes 800 W/m² a na odvrácených stranách hodnot pod 300 W/m², průměrně však okolo 500 W/m². Difuzní záření spadá na většině území do intervalu 100 –

200 W/m², jen v zastíněných oblastech je o kategorii nižší. Odražené záření asi na polovině území nepřekročilo hranici významnosti a je označeno nulou a na zbylém území spadá do kategorie 1 – 100 W/m².

Obr. 7 – Srovnání velikosti složek záření v modelu r.sun



Zdroj: Hofierka, Šúri, 2002

Jedním ze způsobů, které navrhuje např. Dubayah a Rich (1995), jak vypočítat odražené záření, je vypočítat průměrné odražené záření a to pak upravovat podle podmínek konkrétního měřeného bodu. V těchto úpravách by mělo být zahrnuto jak to, že se záření nešíří izotropně, tak geometrické efekty mezi měřeným bodem a okolními viditelnými plochami. Dubayah a Rich (1995) však poznamenávají, že je to komplikované a navrhují zjednodušení. Místo anizotropního šíření využívají izotropní a modelovaný terén pro potřebu výpočtu odraženého záření nahrazují nekonečně dlouhou nakloněnou rovinou o stejném sklonu jako v měřeném bodě. Výsledek pak opraví o faktor „viditelnosti oblohy“. To je podíl oblohy, která je viditelná z daného místa na hemisférickém obrazu okolí. Například na dně kaňonu, kde podstatnou část viditelného okolí zaujímají stěny kaňonu, je podíl viditelné oblohy malý, naopak na rovném poli je podíl viditelné oblohy velký.

Podobný vzorec je využit v modelu r.sun, kde Hofierka a Šúri (2002, s. 7) uvádí, že „záření odražené od země a dopadající na přilehlý povrch je proporcionální k globální horizontální intenzitě záření, k průměrnému albedu okolí a podílu okolí, které je viditelné příkloněným povrchem.“ Uvádí vzorec:

$$R_i = \rho_g G_{hc} r_g(\gamma_N) \quad (3.2.2)$$

kde R_i je výsledné odražené záření, ρ_g je průměrné okolní albedo, G_{hc} je globální horizontální intenzita záření a $r_g(\gamma_N)$ je definováno jako:

$$r_g(\gamma_N) = \frac{1 - \cos \gamma_N}{2} \quad (3.2.3)$$

kde γ_N je úhel sklonu povrchu.

V této práci bude navržen postup, který místo průměrného odraženého záření jako výchozí hodnoty a nahrazení povrchu nakloněnou rovinou bude počítat odražené záření přímo z prostorových geometrických vztahů okolních osvětlených viditelných ploch, jejich odrazivosti a intenzity záření, které na ně dopadá. Pro výpočet je tedy třeba znát odrazivost okolních povrchů, proto se získáním této hodnoty zabývá další kapitola.

b) Výpočet spektrální odrazivosti regolitu ve viditelném spektru

Na rozdíl od Země, kde se odrazivost prostorově velmi liší kvůli různorodosti povrchů a průměrné albedo se určuje kolem 31 %, jak bylo psáno v kapitole 3.1c), je odrazivost Měsíce kvůli vyšší homogenitě povrchu méně prostorově variabilní. Měření ukazují, že průměrná odrazivost regolitu, tedy typického pokryvu Měsíce, je oproti průměrné odrazivosti zemského povrchu také menší. Průměrné albedo Měsíce např. NASA (2014b) uvádí 11 %. Extrémní hodnoty albeda přivrácené strany Měsíce měřili např. Saari, Shorthill (1972), kteří uvádějí maximální hodnotu 21,9 % a minimální 5,16 %.

Jak je blíže popsáno v kapitole 4.2, sonda LRO zaznamenávala množství energie navráceného laserového paprsku dopadajícího na detektor. Vzhledem ke známé velikosti energie vyslaného paprsku, která činí 2,7 mJ, lze jednoduchým výpočtem zjistit odrazivost měřeného povrchu na vlnové délce vyslaného laserového paprsku, tedy 1024 nm:

$$\alpha_{1024} = \frac{E_r}{E_s} \quad (3.2.4)$$

kde α_{1024} je hodnota odrazivosti pro vlnovou délku 1024 nm, E_r je hodnota přijaté energie a E_s je hodnota vyslané energie, tedy 2,7 J.

Protože má však tato práce a výsledný model sloužit pro využití na lunárních základnách, kde by dopadající záření bylo využíváno především pro výrobu fotovoltaické energie, zdroj světla pro rostliny či lidskou posádku, je třeba odrazivost přepočítat pro vlnové délky viditelného světla.

Jako určující vlnová délka v oblasti viditelného světla bude stanovena vlnová délka zelené barvy, protože v této vlnové délce Slunce vysílá maximální množství energie, a je tak hlavním zdrojem pro zelené rostliny. Tuto vlnovou délku lze vypočítat z Wienova posunovacího zákona. Při teplotě Slunce 5777 K, která byla stanovena výše, platí, že:

$$\lambda_{max} = \frac{2,898 * 10^{-3}}{5777} = 5,01 * 10^{-7} = 501 \text{ nm} \quad (3.2.5)$$

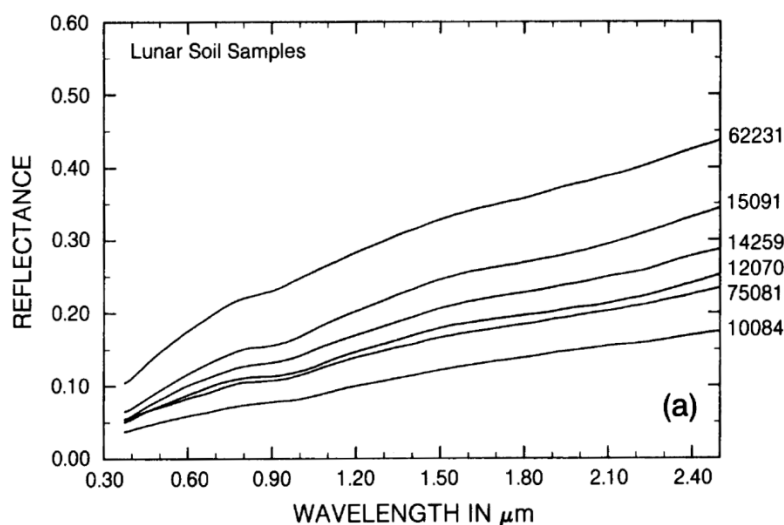
Pro přesný přepočet mezi infračerveným a viditelným spektrem by bylo zapotřebí mít spektrální křivky odrazivosti pro konkrétní měřený povrch. Takováto měření se však

v rámci měření výšek povrchu neprovádějí, a proto je nutné přistoupit k určitému zjednodušení. Ze vzorků přivezených z Měsíce na Zemi byly v laboratoři vytvořeny spektrální křivky některých reprezentativních typů povrchu, které jsou vidět na Obr. 8.

Tyto vzorky jsou: vyzrálý regolit z oblasti moře (10084), středně vyzrálý regolit z oblasti moře (12070), vyzrálá půda vyvinutá na brekcích (14259), vyzrálá půda z oblasti přechodu mezi vysočinou a mořem (15091), vyzrálá půda z oblasti vysočiny (62231), středně vyzrálá půda z oblasti moře (75081).

Jak je vidět, vzorky se liší v absolutních číslech, ale v relativním vztahu vůči sobě si zachovávají poměrně konstantní odstup, tedy je zde ve všech křivkách patrný stoupající trend s přibývajícím vlnovou délkou. Tohoto obecného trendu bylo využito pro přepočítání z infračerveného spektra do viditelného.

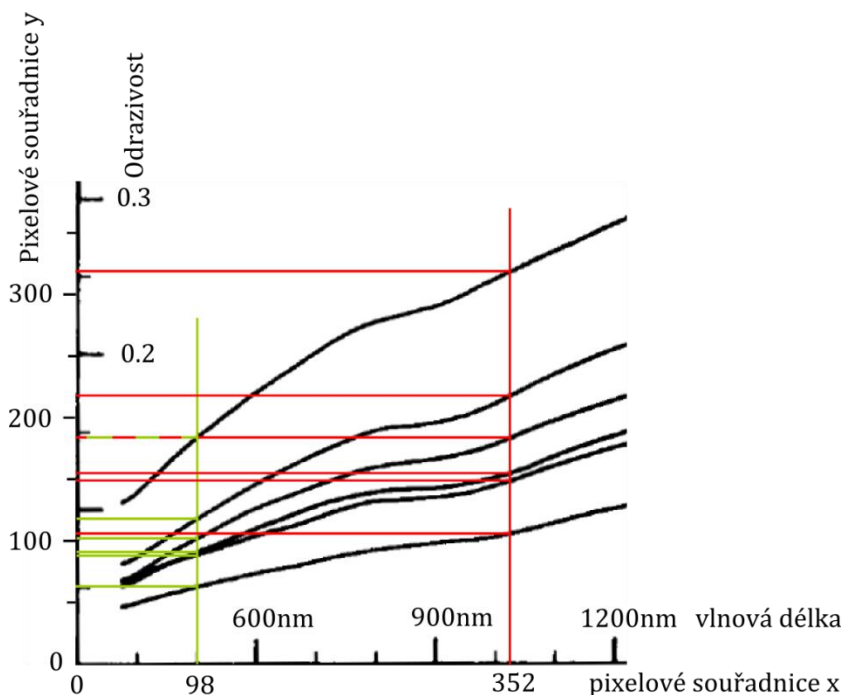
Obr. 8 – Spektrální křivky lunárního regolitu



Zdroj: Heiken, Vaniman, French, 1991

Aby bylo možné trend kvantifikovat, bylo třeba zjistit hodnotu odrazivosti jednotlivých vzorků jak pro vlnovou délku 1024 nm, tak pro vlnovou délku 501 nm. Protože v rámci publikace Heiken, Vaniman, French (1991) nejsou k dispozici naměřená data, ale pouze výsledná křivka, jediným možným, ač ne zcela přesným způsobem určení těchto hodnot je odečtení z grafu. Aby byla přesnost maximalizována, byly v grafickém programu odečteny pixelové souřadnice y jednotlivých křivek v bodě odpovídající svou x souřadnicí vlnové délce 1024 nm, respektive 501 nm, viz Obr. 9.

Obr. 9 – Grafické odečtení hodnot odrazivosti



Odečtené pixelové souřadnice y jednotlivých vzorků byly vloženy do tabulky a byl vypočítán poměr odrazivosti ve viditelném spektru (VIS) a infračerveném spektru (IR). Nakonec byl vypočítán průměr z jednotlivých poměrů, jak je vidět v Tab. 3.

Tab. 3 – Poměry odrazivosti vzorků v IR a VIS

ID	10084	75081	12070	14259	15091	62231
y pro IR	108	150	156	185	220	320
y pro VIS	65	89	92	103	119	186
VIS/IR	0.60	0.59	0.59	0.56	0.54	0.58
Průměr	0.58					

Rozdíl mezi nejnižším a nejvyšším poměrem je pouze 0,06, takže lze průměrnou hodnotu 0,58 jako koeficient k převodu mezi IR a VIS brát pro účely výpočtu odraženého záření jako dostatečně přesnou. Z naměřené hodnoty navrácené energie tak lze spočítat odrazivost v IR a tu poté vynásobit koeficientem 0,58. Výsledkem je hodnota odrazivosti měřeného bodu ve viditelném spektru.

c) Postup výpočtu odraženého záření

K výpočtu odraženého záření z okolních ploch, které dopadá na měřené místo, je tedy třeba znát několik údajů. Především intenzitu dopadajícího přímého záření na okolní plochy, tím se zabývá kapitola 3.3. Dále odrazivost okolních povrchů, kterou lze získat

z dat laserového skenování, jak bylo popsáno v předchozí kapitole. Dalšími údaji jsou vzdálenost a výměra osvětlených viditelných ploch z měřeného místa, které lze získat správným použitím geoinformatických funkcí nad digitálním modelem terénu. Popis konkrétních využitých funkcí je uveden v kapitole 4.6d). Pro zjednodušení následujícího textu zde bude definována „odrazivá plocha“ jako plocha, která je osvětlená slunečním zářením a je viditelná z „cílové plochy“, což je plocha, ve které je modelováno výsledné odražené záření.

Pokud využijeme zjednodušující předpoklad, že záření se šíří po odrazu ve všech směrech stejně a že na Měsíci neexistuje atmosféra, je možné vypočítat, podobně jako u výpočtu solární konstanty ve vzorci 3.1.3, intenzitu záření dopadající na metr čtvereční kolmé plochy ke směru odraženého záření v dané vzdálenosti. Záření se tedy šíří v podobě jakési polokulové plochy, která se zvětšuje, a intenzita slábne s druhou mocninou vzdálenosti. Je zde vypočítán zářivý tok úměrný velikosti odrazivé plochy, intenzitě dopadajícího záření na tuto plochu a odrazivosti, tedy:

$$\Phi_r = G_i \alpha S \quad (3.2.6)$$

kde Φ_r je zářivý tok odražený z odrazivé plochy S , která je ozařována zářením o intenzitě G_i a má odrazivost α . Protože G_i je v jednotkách W/m^2 , albedo je bezrozměrná veličina a s plochou se počítá v m^2 , po vynásobení je jednotkou výsledku W .

Intenzita záření dopadající na kolmou plochu ke směru záření v určité vzdálenosti je tedy vypočítána jako:

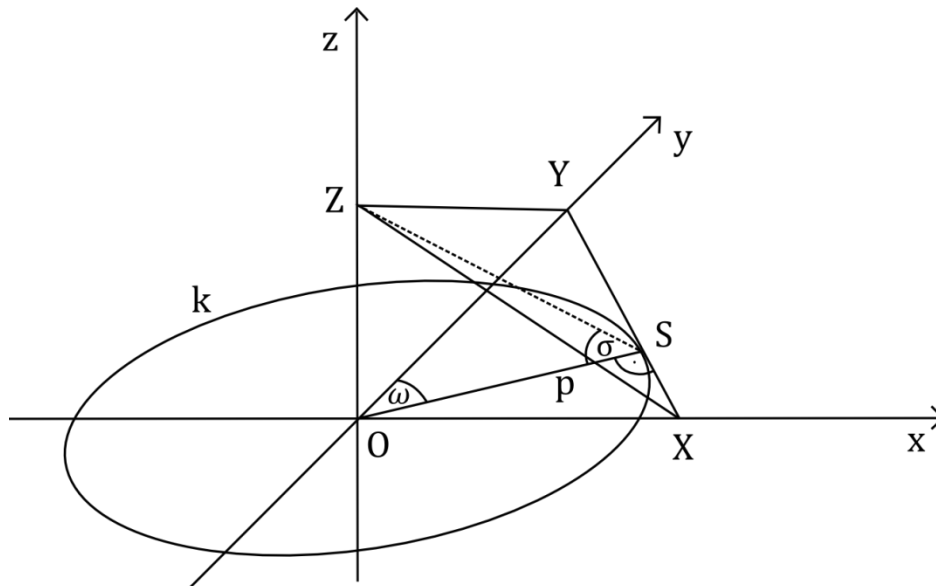
$$I_{r\perp} = \frac{\Phi_r}{4\pi d^2} \quad (3.2.7)$$

kde $I_{r\perp}$ je výsledná intenzita v ploše kolmé na odražené záření, Φ_r je zářivý tok z této plochy a d je vzdálenost středu odrazivé plochy od měřeného bodu.

Cílová plocha, ve které je třeba znát odražené záření, však není většinou kolmá na směr tohoto záření, proto je třeba do výsledné intenzity ozařování zahrnout geometrické vztahy modelovaných ploch. Jedná se především o sklon a orientaci. Pokud například budou mít obě plochy nulový sklon, všechno odražené záření projde nad povrchem a žádné záření na plochu nedopadne. Pokud budou plochy navzájem kolmé a budou mít opačnou orientaci, tedy rozdíl jejich orientací bude roven úhlu 180° , intenzita ozáření bude při dané vzdálenosti maximální. Geoinformační systémy umožňují sklon i orientaci modelovaných ploch digitálního modelu terénu jednoduše spočítat, a umožňují tak tyto prostorové geometrické vztahy modelovat.

Vzhledem k zjednodušení geometrie odrazu na difuzní typ, nezáleží při modelování geometrických vztahů na sklonu a orientaci odrazivé plochy. Záleží pouze na úhlu dopadu těchto odražených paprsků na cílovou plochu. Ten se mění se změnou sklonu a orientace cílové plochy a s polohou odrazivé plochy vůči ploše cílové. Protože se záření šíří ve všech směrech stejně, plocha je viditelná, což zajistí geoinformační funkce viditelnosti, a protože nezáleží na sklonu a orientaci odrazivé plochy, můžeme ji pro zjednodušení nahradit „odrazivým bodem“ ve středu odrazivé plochy, ze kterého se toto záření šíří. Úhel dopadu paprsků lze pak vypočítat z odchylky dvou vektorů, a to vektoru \vec{v} z odrazivého bodu do středu cílové plochy, tedy „cílového bodu“ a normálového vektoru \vec{n} roviny cílové plochy o daném sklonu a orientaci. Pro výpočet vektoru \vec{v} je třeba znát souřadnice obou bodů a pro výpočet vektoru \vec{n} stačí znát sklon a orientaci. Pro výpočet vektoru \vec{n} nemusí být souřadný systém definován ve stejném počátku jako souřadný systém pro výpočet vektoru \vec{v} , ale pokud bude jeho uspořádání stejné a bude pouze posunut, bude správnost výsledného úhlu zachována, protože vektory udávají pouze velikost a směr, nikoliv polohu. Proto pro výpočet vektoru \vec{n} definujeme následující podmínky, které jsou zobrazeny na Obr. 10.

Obr. 10 – Zákres roviny XYZ a úhlu sklonu a orientace



Definujme pravoúhlou pravotočivou soustavu souřadnic xyz v prostoru takovou, že osa y směřuje na sever, osa x směřuje na východ a osa z je na tyto dvě osy kolmá v počátku souřadnic O a jednotkou je metr. Dále definujme kružnici k v rovině dané osami x a y , se středem O a poloměrem 1. Nyní definujme rovinu XYZ takovou, že její průsečnice s rovinou danou osami x a y bude tečnou přímkou ke kružnici k v bodě S , a nazvěme průsečíky s osou x bodem X , s osou y bodem Y a s osou z bodem Z . Tato rovina může mít libovolný sklon a libovolnou orientaci. Sklon je definován jako odchylka roviny XYZ od roviny dané osami x a

y , tedy úhel $\sphericalangle OSZ$, neboli σ . Pro definování orientace je nutné definovat přímku p , která je kolmá na průsečnici roviny XYZ s rovinou danou osami x a y a prochází počátkem O . Orientace je pak úhel mezi osou y a přímkou p v matematicky záporném směru, tedy úhel $\sphericalangle YOS$, neboli ω .

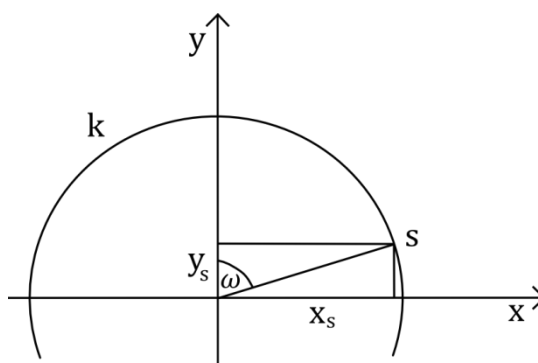
Pokud bude mít rovina XYZ nulový sklon, bude shodná s rovinou danou osami x a y a bude mít i neurčitelnou, respektive libovolnou orientaci, její normálový vektor pak bude shodný se směrovým vektorem osy z tedy $(0;0;1)$. Pokud jsou sklon a orientace známy, lze za těchto podmínek vypočítat následujícím způsobem normálový vektor roviny XYZ .

Protože bod S leží na jednotkové kružnici k v rovině dané osami y a x , je možné jeho souřadnice vypočítat jako:

$$\begin{aligned} S[x; y; 0] : x &= \sin \omega \\ y &= \cos \omega \end{aligned} \quad (3.2.8)$$

kde ω je úhel orientace roviny.

Obr. 11 – Schéma výpočtu souřadnic bodu S



Protože tečna je vždy kolmá na poloměr v bodě dotyku, je přímka OS kolmá na přímkou XY v bodě S , a tedy směrové vektory těchto přímek jsou kolmé. Ze směrového vektoru \vec{a} přímky OS vypočítáme směrový vektor \vec{b} přímky XY , protože v rovině je skalární součin kolmých vektorů roven nule:

$$\begin{aligned} \vec{a} &= S - O = (\sin \omega ; \cos \omega ; 0) \\ a_1 b_1 + a_2 b_2 &= 0 \\ \vec{b} &= (-\cos \omega ; \sin \omega ; 0) \end{aligned} \quad (3.2.9)$$

Bod Z náleží ose z , takže jeho x i y souřadnice je rovna 0 a souřadnice z je rovna:

$$Z [0; 0; z]: z = \tan \sigma \quad (3.2.10)$$

kde σ je úhel sklonu.

Se známými souřadnicemi bodu Z lze snadno vypočítat směrový vektor \vec{c} přímky ZS :

$$\vec{c} = Z - S \quad (3.2.11)$$

$$\vec{c} = (-\sin \omega; -\cos \omega; \tan \sigma)$$

Protože oba vektory \vec{b} i \vec{c} náležejí rovině XYZ , lze jejich vektorovým součinem vypočítat vektor, který je na oba kolmý, a je tak normálovým vektorem n roviny XYZ .

$$\vec{n} = (b_2c_3 - b_3c_2; b_3c_1 - b_1c_3; b_1c_2 - b_2c_1) \quad (3.2.12)$$

$$\vec{n} = (\sin \omega \tan \sigma; \cos \omega \tan \sigma; \cos^2 \omega + \sin^2 \omega)$$

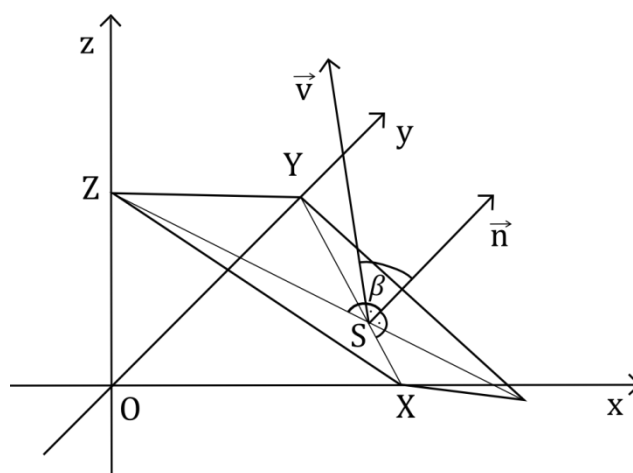
$$\vec{n} = (\sin \omega \tan \sigma; \cos \omega \tan \sigma; 1)$$

Vektor \vec{v} lze vypočítat odečtením souřadnic x a y bodu odrazivosti a cílového bodu v daném kartografickém zobrazení a odečtení výšek povrchu pro souřadnici z . Nyní zbývá už pouze vypočítat odchylku těchto vektorů:

$$\cos \beta = \frac{\vec{n} \cdot \vec{v}}{|\vec{n}| |\vec{v}|} \quad (3.2.13)$$

kde β je doplněk do 90° k úhlu dopadu paprsků z odrazivého bodu.

Obr. 12 – Odchylka vektoru odraženého záření a normálového vektoru roviny



Výsledná intenzita záření je potom rovna násobku kosinu tohoto úhlu a intenzity v ploše kolmé na směr záření ze vzorce 3.2.7:

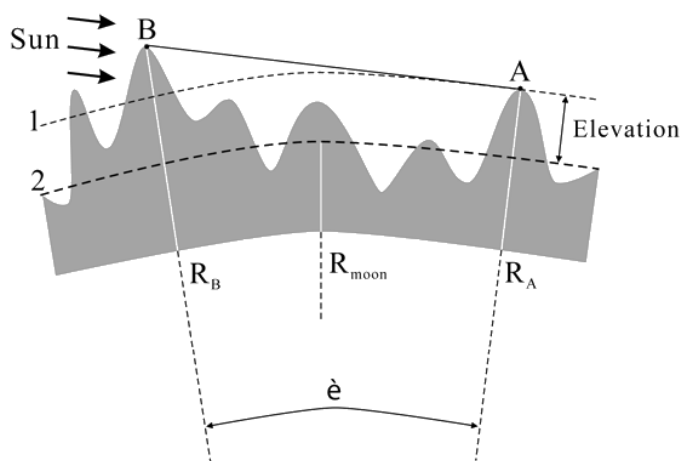
$$I_r = I_{r\perp} \cos \beta \quad (3.2.14)$$

3.3 Zastínění přímého slunečního záření a jeho intenzita

Jak již bylo psáno v kapitole 2.2d), Li a kol. (2012) v rámci své práce vytvořili pouze teoretický předpis pro vypočítání a porovnávání kritických elevací jak je zobrazeno na Obr. 13. V předkládané diplomové práci bylo navrženo vlastní řešení s využitím digitálního modelu terénu ve formě TIN. To bylo implementováno a otestováno ve vybraném geoinformačním systému. Postup, který navrhují Li a kol., nebyl využit zejména kvůli snazší algoritmizaci vlastního řešení.

Aby bylo zjištěno, zdali je konkrétní bod osvětlen, či naopak zastíněn okolním reliéfem, je pro každý bod vytvořena linie, která spojuje daný bod s bodem, kde se v daném okamžiku v selenocentrických geografických souřadnicích nachází Slunce. Tato linie je potom porovnána s digitálním modelem terénu, a pokud se prostorově protnou, je bod zastíněn, pokud se s okolním povrchem neprotnou, je osvětlen. Jak bude podrobněji popsáno v kapitole 4.2, data jsou získána ve formátu shapefile a jsou tedy uložena v souřadném systému.

Obr. 13 – Porovnávání kritických elevací



Zdroj: Li ... [et al.], 2012

Formát ESRI shapefile rozděluje dva typy souřadných systémů pro data. Prvním je tzv. geografický souřadný systém, ve kterém jsou data uložena ve svých zeměpisných souřadnicích, pro Měsíc tedy v selenografických souřadnicích. Data tak netrpí žádným zkreslením, ale pro zobrazení v rovině, kterou je i rovina 2D grafického prostředí GIS, je třeba je zobrazit nějakou projekcí. Software ArcMap vykresluje data v geografickém souřadném systému tak, jako by úhly zeměpisných souřadnic byly konstantní délková jednotka, čili celý svět reprezentovaný koulí by se zobrazil do obdélníku se stranami

v poměru 2:1. Pro každý geografický souřadný systém je definováno referenční těleso a nultý poledník.

Druhým typem je souřadný systém mapové projekce, neboli zobrazení. Data nejsou uložena v úhlových jednotkách jako v předchozím typu, ale v rovinných, tedy délkových jednotkách, typicky v metrech. Zeměpisné souřadnice nad definovaným tělesem jsou podle rovnic příslušného kartografického zobrazení přepočítány a tyto výsledky jsou uloženy. V souboru *.prj je pak popsáno jak referenční těleso, tak zvolený kartografický počátek a všechny proměnné daného zobrazení. ESRI nabízí širokou škálu předdefinovaných těles i projekcí, které lze libovolně měnit či vytvářet úplně nové.

Aby byl vytvořený algoritmus univerzální a výsledek byl dobře zobrazitelný pro data pólu i rovníku, je v rámci algoritmu vytvořeno nové zobrazení pro každé zpracovávané území. Dalším ryze praktickým důvodem, proč nebyla data ponechána v původním geografickém souřadném systému, je, že digitální model terénu ve formě nepravidelné sítě trojúhelníků (TIN) nelze ve všech oblastech v tomto souřadném systému správně vytvořit. Okolo rovníku je zkreslení minimální, ale jakmile je území dále od rovníku, jeden stupeň zeměpisné šířky a zeměpisné délky již nepředstavují stejnou vzdálenost. Zatímco jeden stupeň zeměpisné šířky na kouli představuje stále stejnou, tedy konstantní délkovou vzdálenost, délková vzdálenost, která odpovídá jednomu stupni zeměpisné délky, se od rovníku směrem k pólu zmenšuje s kosinem zeměpisné šířky. Algoritmus při výpočtu TIN však počítá s konstantní délkovou jednotkou ve všech směrech, a proto triangulace v geografickém souřadném systému neproběhne korektně. A protože TIN je základní součástí při zvoleném postupu výpočtu osvětlení, je nutné s daty počítat v nějakém kartografickém zobrazení.

Pro tento účel byla vybrána stereografická projekce s metry jako délkovými jednotkami, a to zejména pro svoji jednoduchost a konformitu neboli nezkraslování úhlů. To je důležité především proto, že linie reprezentující sluneční záření, jak bylo popsáno výše, je vytvořena v geografickém souřadném systému. Protože TIN musí být vytvořen v souřadném systému mapové projekce a pro porovnávání prostorových průniků je třeba mít oba objekty ve stejném souřadném systému, byly linie zobrazeny do mapové projekce. Aby azimut těchto linií odpovídal i v rovině projekce, je třeba, aby zobrazení nezkraslovalo úhly, protože azimut je úhel mezi místním poledníkem a danou linií. Projekce do zvoleného zobrazení probíhá pomocí vestavěné funkce vybraného GIS, a proto rovnice a samotný přepočet souřadnic přímo závisí na funkci vyvinuté společností ESRI.

Výškové souřadnice se při projekci nepřepočítávají, jelikož se data zobrazují do roviny. Pro prostorovou analýzu je však třeba, aby linie prostorovou souřadnici měly a

odpovídaly příslušné výšce Slunce nad obzorem. Proto byly využity vzorce publikované Li a kol. (2008). Tyto rovnice, které byly publikovány dříve, se liší od těch v modelu Li a kol. (2012) tím, že počítají s přímou vzdáleností Měsíc-Slunce a ne s úhlem a vzdáleností Měsíc-Země a vzdáleností Země-Slunce, což by byla zbytečná komplikace vzhledem k tomu, že přímá vzdálenost Slunce-Měsíc je známá ze systému *Horizons*. Mimo tento drobný rozdíl jsou rovnice totožné:

$$i = \alpha + \beta \quad (3.3.1)$$

$$\alpha = \arccos [\pm \sin \varphi_n \sin \varphi_d + \cos \varphi_n \cos \varphi_d \cos(\lambda_n - \lambda_d)]$$

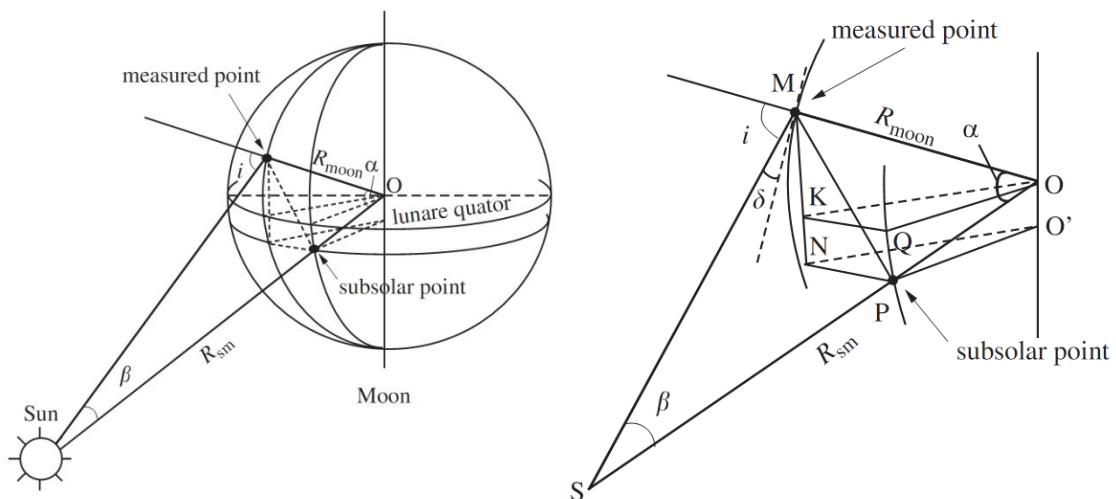
$$\beta = \arcsin \left[\frac{R_m \sin \alpha}{(R_{sm}^2 + R_m^2 - 2R_{sm}R_m \cos \alpha)^{\frac{1}{2}}} \right]$$

$$\delta = \frac{\pi}{2} - i$$

Zdroj: Li ... [et al.] 2008

kde δ je výsledná výška Slunce nad obzorem, i je úhel dopadu záření, neboli doplněk výšky Slunce nad povrchem do 90° , α a β jsou pomocné úhly, patrné z Obr. 14, R_m je poloměr Měsíce, R_{sm} je vzdálenost Měsíce od Slunce, φ_n je selenografická šířka měřeného bodu, φ_d je selenografická šířka subsolárního bodu, λ_n je selenografická délka měřeného bodu a λ_d je selenografická délka subsolárního bodu.

Obr. 14 – Schéma výpočtu výšky Slunce nad obzorem

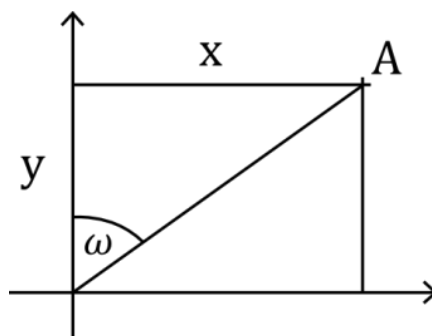


Zdroj: Li ... [et al.] 2008

Z těchto rovnic je tak vypočtena výška Slunce nad obzorem a úhel dopadu slunečního záření. Aby bylo možné tuto informaci do prostorových souřadnic koncového bodu linie zahrnout, je třeba zjistit azimut linie v souřadnicích zvoleného zobrazení.

V modulu *Arcpy* lze zjistit počáteční i koncové souřadnice linie, nikoliv však úhel. Ten musí být z těchto souřadnic vypočítán. Z následujícího nákresu na Obr. 15 lze odvodit rovnice 3.3.2.

Obr. 15 – Výpočet azimutu ze souřadnic

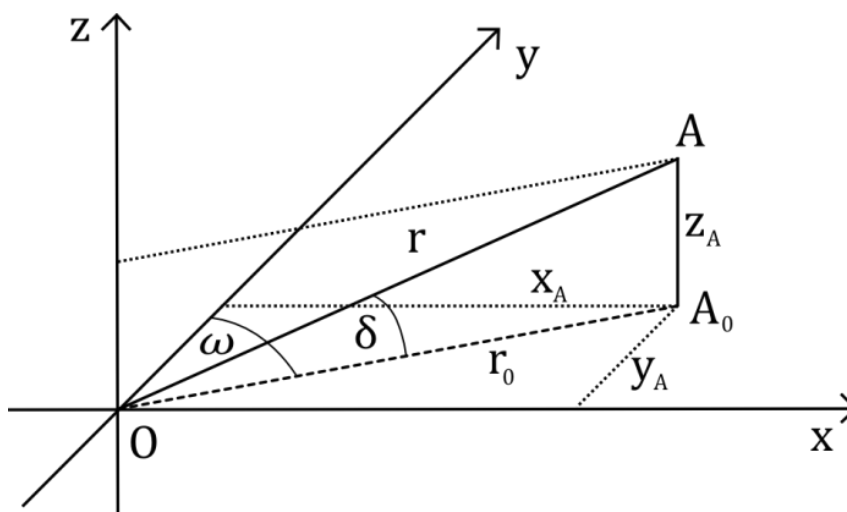


kde:

$$\omega = \arctan\left(\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1}\right) \quad (3.3.2)$$

Jak je vidět, azimut ω vyjadřuje poměr mezi rozdílem koncových a počátečních x a y souřadnic bodu, neboli tangens tohoto úhlu je roven poměru rozdílu souřadnic. Pro první kvadrant vypočtená hodnota odpovídá velikosti úhlu, ale pro ostatní kvadranty je třeba zavést opravu, aby výsledný úhel byl z intervalu $\langle 0; 360 \rangle$. Pro třetí a čtvrtý kvadrant, tedy pro záporné hodnoty souřadnice y , je třeba k výslednému úhlu připočítat 180° . Pro druhý kvadrant je třeba připočítat 360° .

Obr. 16 – Transformace sférických souřadnic na pravouhlé



Linie je pak v prostoru přesně určena azimutem, výškou Slunce nad obzorem a délkou. Protože zastínit bod může pouze povrchový útvar Měsíce, ostatní kosmická tělesa

mezi Sluncem a Měsícem jsou zanedbána, není třeba linii vytvářet s délkou rovnou vzdálenosti Měsíc-Slunce. Stačí vytvořit linii dlouhou 180 km, protože to je nejvyšší možná vzdálenost, při které hraje roli členitost okolního povrchu, jak bylo uvedeno v kapitole 2.2d). Vypočtení prostorových souřadnic bodu je tak transformací mezi sférickými (ω , δ , r) a pravoúhlými (x,y,z) souřadnicemi bodu. Tuto transformaci lze odvodit z Obr. 16, kde ω je azimut, δ je výška Slunce nad obzorem, r je vzdálenost, A je měřený bod a x_A, y_A, z_A jsou prostorové souřadnice bodu A . Rovnice pro přepočítání pak zní:

$$\delta = 90^\circ - i \quad (3.3.3)$$

$$r_0 = r \cos \delta = r \sin i$$

$$x_A = \sin \omega r_0 = r \sin \omega \sin i$$

$$y_A = \cos \omega r_0 = r \cos \omega \sin i$$

$$z_A = r \sin \delta = r \cos i$$

Výsledkem jsou souřadnice koncového bodu linie v daném zobrazení. Počáteční bod této linie je vytvořen ve stejných souřadnicích jako měřený bod, ale jeden metr nad povrchem. To zejména proto, aby se model terénu, který je z těchto bodů vytvořen, rovnou neprotínal s příslušnou křivkou, protože dotyk je brán jako průnik. I vzhledem k využití dopadajícího záření se předpokládá nějaká základní výška potenciálního objektu.

Opravené linie jsou tak porovnány s digitálním modelem terénu a jsou zaznamenány všechny průniky. V případě, že daná linie neprotíná model terénu, je bod, ke kterému linie náleží, osvětlen. Je tedy pro tento bod vypočítána intenzita ozařování. Ta je dle vzorců Li a kol. (2012) úměrná solární konstantě a úhlu dopadu paprsků jako:

$$I_g = k \cos i \quad (3.3.4)$$

Tato hodnota tedy nebere v úvahu sklon dle digitálního modelu terénu v daném bodě, protože se nepředpokládá stejný sklon a orientace plochy, která bude využívat dopadající záření (např. plocha fotovoltaického panelu), jako sklon a orientace plochy digitálního modelu terénu.

Pokud by bylo třeba sklon a orientaci lokální plochy vzít v úvahu, například pro vizualizaci osvětlení povrchu, lze pomocí vzorců 3.2.12, 3.2.13 a 3.3.3 vypočítat normálový vektor roviny, vektor dopadajících slunečních paprsků a spočítat jejich odchylku. Hodnota intenzity ozařování přímo v ukloněné ploše pak odpovídá součinu kosinu tohoto úhlu s hodnotou solární konstanty.

4. Popis dat a algoritmizace

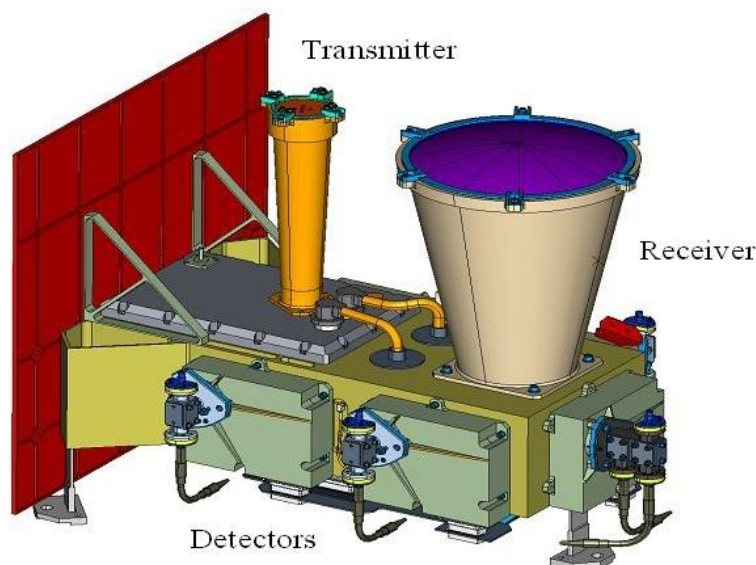
Většina algoritmů integrovaných v GIS, které počítají intenzitu osvětlení, využívají při výpočtu nějaký typ digitálního modelu terénu. Tři z výše popisovaných modelů pracují s rastrovou reprezentací povrchu. I pro povrch Měsíce existují rastrová data, například ze sondy *Clementine*. Ale v současnosti nejpřesnější data, která mají nejvyšší prostorové rozlišení, jsou bodová laserová data ze sondy *Lunar Reconnaissance Orbiter* (LRO) z instrumentu *Lunar Orbiter Laser Altimeter* (LOLA). Celý algoritmus popisovaný dále v práci je vytvořen přímo pro tato data, a proto bez úprav s tím spojených není výsledný skript univerzálně použitelný. Aby bylo zřejmé, jak jsou data vytvořena, je v další kapitole popsán senzor LOLA.

4.1 Instrument Lunar Orbiter Laser Altimeter

Jediná místa, která byla před startem sondy LRO 18. června 2009 zmapovaná s dostatečnou přesností pro přistání, byla ta, kde přistály moduly mise *Appolo*. Cílem instrumentu LOLA je proto vytvořit topografickou mapu s globálním pokrytím Měsíce, ze které bude možné určit bezpečné přistávací lokality pro další mise kdekoliv na Měsíci.

LOLA využívá krátkých (6 ns) pulsů z jednoho laseru, které jsou opticky rozděleny do pěti paprsků. Pro každý z těchto paprsků je při návratu měřena doba letu (vzdálenost), rozšíření pulsu (hrubost povrchu) a intenzita navrácené energie paprsku (odrazivost povrchu). (Riris, 2010)

Obr. 17 – Instrument Lunar Orbiter Laser Altimeter



Zdroj: Riris ... [et al.], 2010

Laser pracuje v blízkém infračerveném spektru na vlnové délce 1064,3 nm. I po optickém rozdělení pulsu do pěti paprsků si každý z nich zachovává přibližnou hodnotu energie počátečního pulsu 2,7 mJ, což je důležité při výpočtu odrazivosti povrchu. Další údaje jsou uvedeny v Tab. 4. (Riris ... [et al.], 2010)

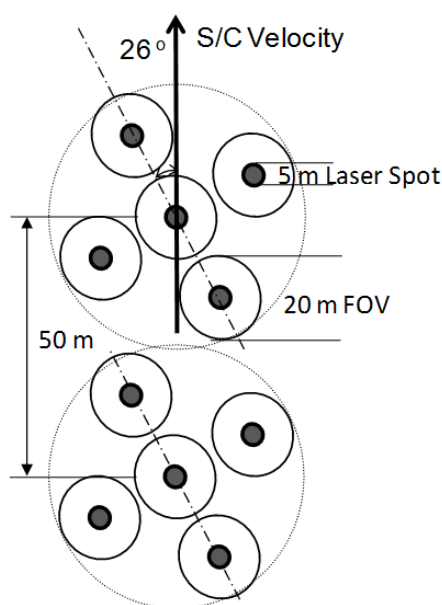
Tab. 4 – Parametry instrumentu LOLA

Parametr	Hodnota
Vlnová délka	1064,3 nm
Energie pulsu	2,7 mJ
Délka pulsu	6 ns
Frekvence opakování pulsu	28 Hz
Divergence paprsku	100 μ rad
Mezera mezi jednotlivými paprsky	500 μ rad
Poloměr aparatury přijímače	0.14 m
FOV přijímače	400 μ rad

Zdroj: Riris ... [et al.], 2010

Na Obr. 18 je zobrazeno schéma rozložení paprsků na povrchu při dopadu, a tedy přibližné vzorkování dat. Ve směru letu jsou od sebe jednotlivé body vzdáleny průměrně 20 m, přičemž každý bod představuje plochu o poloměru 5 metrů. Vzájemná poloha jednotlivých paprsků byla navržena tak, aby těchto pět bodů zajistilo dostatečně podrobný popis dostatečně velké plochy pro možné přistání.

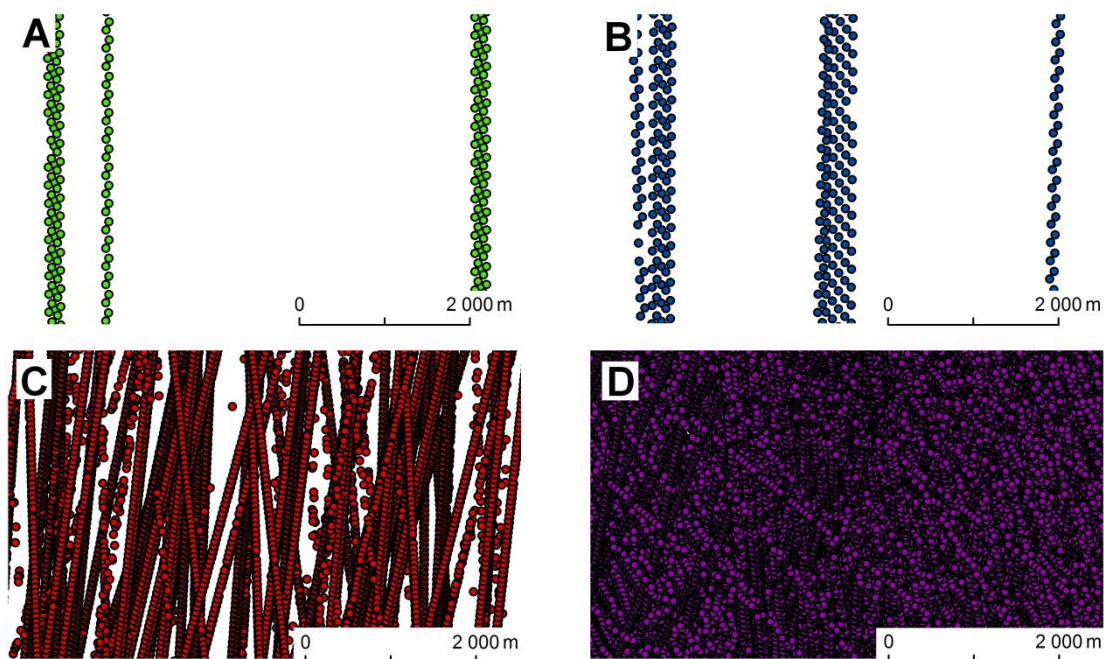
Obr. 18 – Rozložení laserových pulsů



Zdroj: Riris ... [et al.], 2010

Protože sonda LRO je družice s polární oběžnou dráhou letu, prostorové rozlišení ve směru kolmém na směr letu je závislé na selenografické šířce (blíže k pólu jsou měření hustší) a na době, po kterou družice měří (čím déle družice Měsíc obíhá, tím více naměří dat a vznikne hustší pokrytí). Proto výběr lokality výrazně ovlivňuje prostorové vlastnosti dat (viz Obr. 19).

Obr. 19 – Vzorčky dat dle selenografické šířky



A – 10° severní šířky, B – 50° severní šířky, C – 80° severní šířky, D – 90° jižní šířky

4.2 Popis dat

Samotná prostorová data jsou volně dostupná na webovém portálu NASA Planetary data system (NASA, 2014c). Zde je možné si vybrat rozsah zvoleného území a to buď specifikací selenografické délky a šířky, nebo výběrem ze široké škály předdefinovaných měsíčních útvarů. Data je pak možné stáhnout ve třech typech souborů a to ve formátu IMG, CSV nebo shapefile. V této práci byla využita možnost shapefile, kvůli přímé podpoře tohoto formátu geoinformačními systémy. Do počtu tří milionů bodů je možné data ihned stahovat, nad tento počet je třeba pomocí formuláře kontaktovat NASA a vyčkat na zaslání jimi vygenerovaných dat.

Data ve formátu shapefile jsou rozdělena do 5 souborů, z nichž každý plní jinou funkci. Atributy jsou uloženy v databázovém souboru **.dbf* a vzhledem k jejich počtu se jedná o nejobtavnější soubor. Samotná geometrie, tedy souřadnice jednotlivých bodů,

je uložena v souboru *.shp a *.shx. Soubor *.prj obsahuje popis referenčního tělesa a na něm definovaného kartografického zobrazení, ve kterém jsou data uložena. Celkový popis dat včetně jednotlivých atributů je uložen v souboru *.xml.

Celkem má každý bod 34 atributů, z nichž jsou v této práci využity pouze 4. Webový portál však neumožňuje vybrat pouze některé atributy, takže je nutné stáhnout i větší množství dat, která pro výpočet intenzity osvětlení nebudou využita. Nevyužití atributy popisují například přesný datum a čas pořízení každého bodu (*UTC_time*), nastavenou prahovou hodnotu na detektoru (*PtThresZ*), zaznamenaný šum v pikowatech (*PtNoise*), číslo oběhu družice na orbitě (*FrOrbit*) a další údaje popisující mimo jiné například polohu družice vůči Měsíci a Zemi.

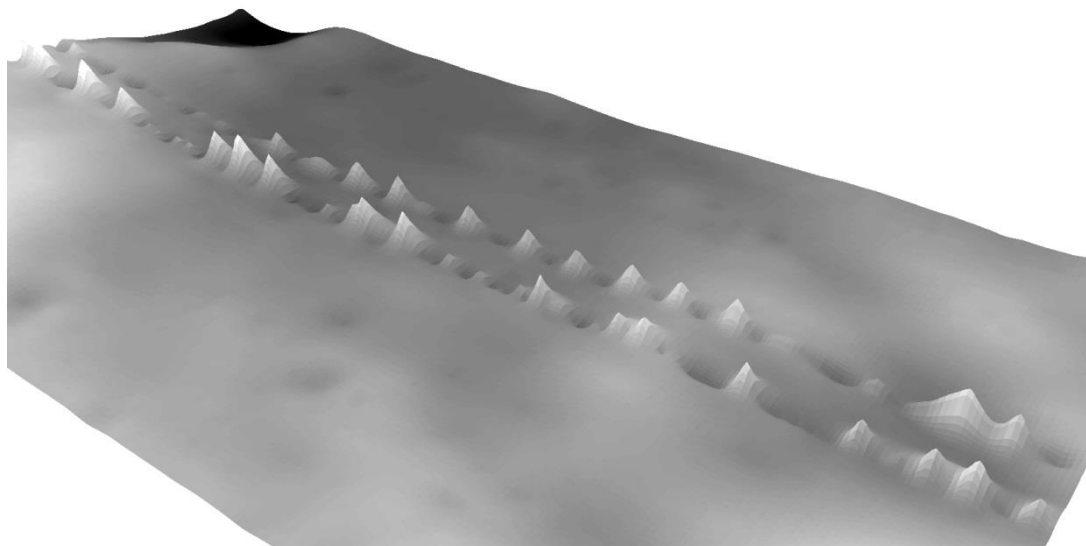
Algoritmus při výpočtu využívá selenografické souřadnice bodu, tedy atribut selenografická šířka (*PtLat*) a selenografická délka (*PtLon*). Obdobou zemské nadmořské výšky je na Měsíci „výška povrchu“, což je rozdíl poloměru v měřeném místě s průměrným poloměrem Měsíce 1737,4 km uvedený v metrech (*PtTopo*), neboli vertikální členění povrchu vypočítané z doby letu laserového paprsku. Posledním využitým atributem je hodnota navrácené energie na detektoru z konkrétního bodu v milijoulech (*PtEnergy*), z které lze porovnáním s vyslanou energií vypočítat hodnotu odrazivosti povrchu v bodě na dané vlnové délce.

Občas se v datech vyskytují zjevně chybné hodnoty, zejména tedy v atributu výšky povrchu, takže v některých lokalitách je třeba data filtrovat. Proto byla filtrace do algoritmu zahrnuta jako volitelná možnost a podrobněji se jí zabývá následující kapitola.

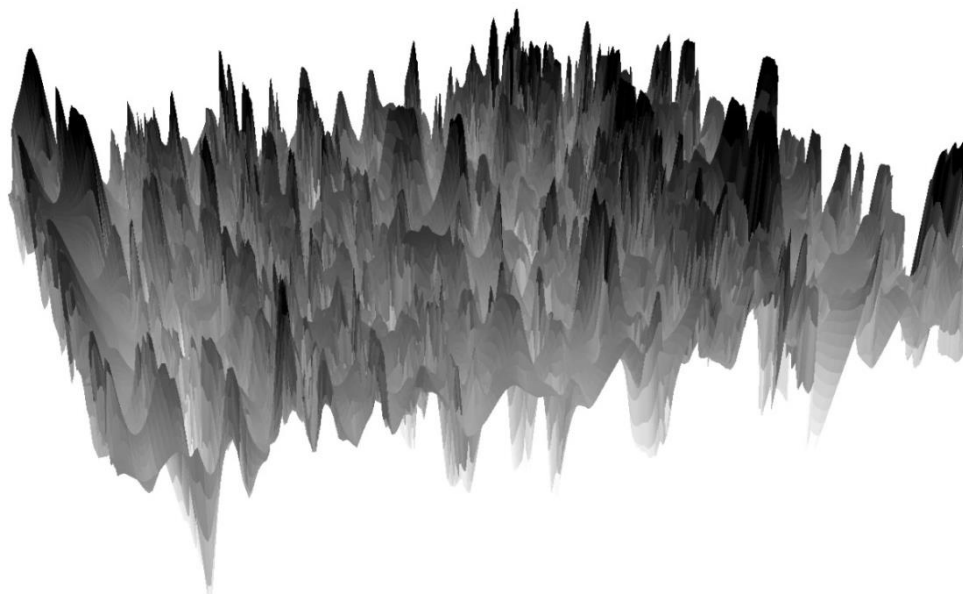
4.3 Filtrace dat

Chybné výškové hodnoty se často váží na konkrétní průlet trasovacího radiometru, tedy vznik je možný například dočasnou nesprávnou funkčností nebo špatnou kalibrací. Chyby se vyskytují jak v kladném, tak v záporném směru souřadnice *z*, jak je vidět na Obr. 20. Výškové chyby se pohybují v řádech desítek až stovek metrů, ve výjimečných případech překračují i rozdíl tisíce metrů mezi nejbližšími body.

Chyby ve výškové souřadnici při laserovém skenování mohou vzniknout několika způsoby, jeden byl uveden výše. Dalším je například vícenásobný odraz, při kterém se paprsek odrazí od povrchu vícekrát a má tak delší trasu a tedy i dobu letu. Výsledná vypočtená vzdálenost z času pak nesprávně indikuje vzdálenější měření, tedy nižší výšku povrchu.

Obr. 20 – Vizualizace chybných výškových hodnot

Chyby v datech jsou poměrně časté. V rámci této práce bylo staženo několik vzorků dat v různých lokalitách měsíčního povrchu a ve většině případů je v datech alespoň několik chybných bodů. Data z jedné lokality jsou dokonce tak chybná, že z nich není možné sestavit reprezentativní model terénu, viz Obr. 21. Zde se například na vzdálenosti 200 metrů běžně vyskytuje převýšení i přes 2500 metrů. Filtrace by pro vytvoření modelu terénu musela být tak drastická, že by výsledkem byl jen rovný průměrný povrch.

Obr. 21 – Chybná data z oblasti 83° s. š., 130° v. d.

Při laserovém skenování povrchu Země se provádí filtrace dat zejména kvůli dvěma důvodům. Za prvé je třeba odstranit hrubé chyby stejně jako na Měsíci, ale zejména se odlišují body odražené od povrchu a body nepovrchové. To jsou body odražené od

vegetace a budov, či jiných antropogenních objektů, které je třeba při vytváření digitálního modelu reliéfu odfiltrout. Tyto body se naopak využívají při vytváření digitálního modelu povrchu.

Protože na Měsíci vegetace není a až na zanedbatelné množství přistávacích modulů se zde nevyskytují ani antropogenní objekty, jsou všechna data povrchová, a tedy měření jsou buď správná, nebo chybná.

Pro odfiltrování chybných dat byl využit následující postup. Byl vytvořen rastrový model reliéfu ze všech naměřených bodových dat, jaký je zobrazen třeba na Obr. 20. Na tento povrch byl aplikován zahlazovací nízkofrekvenční filtr, který průměruje hodnoty z několika okolních buněk. Naměřené hodnoty jsou pak porovnány s tímto průměrem, a pokud se liší o víc než o předem stanovenou hodnotu, kterou je možno před spuštěním nastavit, jsou odfiltrvány. Výsledný model terénu a následná analýza je prováděna nad data, ve kterých se tyto extrémní hodnoty již nevyskytují.

Tento způsob funguje dobře pro velké rozdíly v naměřených výškách a dobře se tedy odfiltrují například body s vícenásobným odrazem, protože ty bývají osamocené a mají velký rozdíl výšek od okolních měření. Pokud se však v datech vyskytuje nějaká systematická chyba, která ovlivňuje stejným způsobem více dat blízko sebe, jako například na Obr. 21, tento postup je méně účinný, protože i zprůměrovaný model reliéfu je vyšší váhou těchto podobných měření zatížen a není tak dobře shlazen. Pro odfiltrování chybných dat takového typu a rozsahu by bylo třeba komplexnějších algoritmů, jejichž rozebírání, zkoumání a porovnávání však není smyslem této práce.

4.4 Oprava výšek povrchu

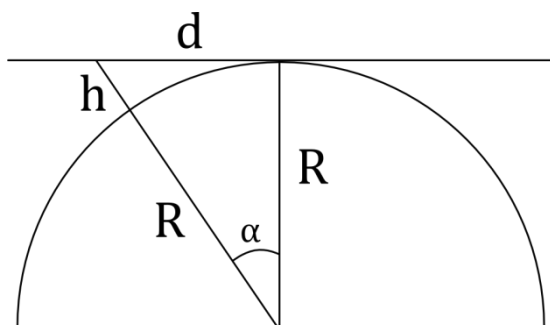
Li a kol. (2012) spočítali, že poloměr okolí, které je třeba brát v potaz při výpočtu zastínění reliéfu, dosahuje na Měsíci vzdálenosti 180 km. A protože při výpočtu jsou data v azimutální projekci, tedy v rovině, při takto velké vzdálenosti by docházelo ke značnému zkreslení výšek kvůli zakřivení povrchu Měsíce. Tuto chybu bylo potřeba opravit.

Proto jsou v algoritmu před samotným výpočtem digitálního modelu terénu výšky povrchu přepočítány. Jak je vidět z Obr. 22, hodnota výšky povrchu konkrétního bodu se opraví o vzdálenost h , respektive vzdálenost h je od výšky povrchu odečtena. Velikost h je závislá pouze na vzdálenosti d , což je vzdálenost od středu projekce. Protože, jak je napsáno v kapitole 3.3, souřadný systém projekce je v metrech a výška povrchu také v metrech, je možné hodnotu d spočítat přímo z kartografických souřadnic měřeného bodu a to prostým vyjádřením kartézské vzdálenosti:

$$d = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4.4.1)$$

kde d je výsledná vzdálenost, x je x-ová souřadnice bodu a y je y-ová souřadnice bodu.

Obr. 22 – Oprava výšek povrchu



Protože tečná rovina je kolmá k poloměru koule v tečném bodě, lze vypočítat velikost úhlu α jako:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{d}{R}\right) \quad (4.4.2)$$

Vzdálenost x pak lze vyjádřit vztahem:

$$\cos \alpha = \frac{R}{h+R} \quad (4.4.3)$$

$$h = \frac{R(1 - \cos \alpha)}{\cos \alpha}$$

Pro vzdálenost 180 km (asi 6°) činí oprava výšky povrchu dle výše uvedených vzorců 9 299,4 metru, což zřejmě není zanedbatelná hodnota. Protože má Měsíc menší poloměr než Země, je oprava výšek při stejné vzdálenosti od kartografického pólu vždy vyšší. Nárůst opravy je poměrně strmý, protože už při vzdálenosti 1,9 km od středu překročí hodnota opravy jeden metr.

4.5 Data JPL Horizons

Jak již bylo popsáno v kapitole 2.2d), při výpočtu osvětlení je využíváno dat ze systému *Horizons* z dílny *Jet Propulsion Laboratory* NASA. To je systém, který poskytuje vysoce přesné efemeridy, tedy tabelované údaje o poloze a pohybu nebeských těles a jejich vztazích k ostatním tělesům. Systém se stále vyvíjí a jsou do něj přidávány další objekty. V současnosti popisuje ve sluneční soustavě více než 640 000 asteroidů, 3200 komet, 170 přirozených satelitů, všechny planety, Slunce, vybrané umělé družice a další objekty. Všechny 43 různých údajů, které je možné vybrat, je poskytováno v nejmenším časovém intervalu až po jedné minutě, ale krok si lze libovolně navolit. Je možné nastavit více než

100 pozorovacích lokalit a také měnit souřadné systémy a časová rozpětí, ve kterých budou data poskytnuta (NASA 2013).

Přístup do systému je možný přes telnet, kde má uživatel plný přístup na základě interaktivního uživatelského rozhraní přes příkazovou řádku, a výsledky jsou odeslány buď na email, FTP nebo Kermit. Dalším způsobem, který je možné využít, je požádat o data e-mailem. Dostupná jsou takto téměř všechna data. Nejprve je po zaslání požadavku obdržen soubor s ukázkou příkazů, který uživatel upraví dle svých požadavků, a na základě tohoto souboru jsou pak vygenerována požadovaná data. Posledním typem přístupu je webové rozhraní. Zde je pouze částečný přístup, ale jedná se o grafické uživatelské prostředí, které je pro uživatele přívětivější než předchozí dva případy. Zde je několik hlavních možností, které je třeba navolit. Tento typ byl pro vygenerování dat potřebných pro tuto práci využit a níže je popsán výběr konkrétních parametrů.

První možnost je výběr mezi typem efemerid. Zde se vybírá mezi typem *observer*, kde výsledkem je tabulka pozorovatelných veličin jako je deklinace tělesa nebo rektascenze, nebo možností *vector*, kdy jsou vygenerovány vektory, a poslední možností je typ *elements*, který generuje tabulku oskulačních orbitálních elementů. Pro získání souřadnic subsolárního bodu a vzdálenosti Měsíce od Slunce je třeba využít první možnosti.

Dále je třeba vybrat ze seznamu cílové těleso. Tím může být cokoliv z výše zmíněných počtů těles. V našem případě byl vybrán Měsíc vyhledáním hesla „moon“.

Dále je třeba vybrat umístění pozorovatele, což ale pro námi požadované údaje není podstatné. Je to důležité například tehdy, pokud požadovanými daty je azimut nebo výška objektu nad obzorem. Pro potřeby této práce bylo ponecháno defaultní nastavení *Geocentric*.

Čtvrtým možným nastavením je čas a interval, ve kterém budou data vygenerována. Zde je nutné nastavit počáteční a koncové datum a krok, který je možné číselně specifikovat pro dny, hodiny, roky, měsíce a další. Protože výpočet osvětlení je přímo závislý na těchto datech, je zvolený interval určujícím prvkem pro přesnost výsledného modelu. Aby údajů nebylo příliš mnoho a bylo možné pokrýt delší časové období, byl jako základní krok nastaven jedna hodina a časové rozpětí od 1. 1. 2010 do 1. 1. 2020, tedy na současné desetiletí. Nicméně pokud by bylo třeba modelovat osvětlení v nějaký konkrétní čas mimo tento interval, lze data stáhnout a doplnit je do zdrojového adresáře. Níže je popsáno, jak a kde jsou data uložena.

Dalším specifíkem jsou samotné údaje, které budou vygenerovány. Pro výpočet osvětlení jsou třeba pouze souřadnice subsolárního bodu a aktuální vzdálenost Měsíc – Slunce pro opravu solární konstanty. Jedná se tedy o možnost č. 15 *Sun sub-longitude & sub-latitude* a možnost č. 19 *Heliocentric range & range-rate*. Čas pro konkrétní údaj se zobrazí vždy na prvním místě, aniž by ho bylo třeba vybírat.

Poslední možností je typ zobrazení výsledku. Je možné si nechat výsledky zobrazit v podobě webové stránky, což je pro velké množství dat nepraktické. Dále je možné si data zobrazit v prohlížeči jako čistý ASCII text, anebo je možné tento text stáhnout v podobě *.txt souboru, čehož bylo využito.

Výsledkem je tedy soubor s daty v podobě textu, které jsou uvozeny hlavičkou, popisující fyzikální a dynamické vlastnosti zvoleného objektu, pak následují samotná data oddělená mezerou a na konci dokumentu jsou vysvětleny popisky sloupců zvolených dat. Pro strojní zpracování bylo třeba záhlaví a zápatí dokumentu vymazat a ponechat pouze samotná data. To bylo provedeno pomocí jednoduchého algoritmu v jazyce Python *JPLHorizons.py*, který je přílohou č. 2 a je přiložen v digitální formě na CD. Data jsou jím upravena a rozdělena do více souborů, aby byl zrychlen proces nalezení příslušného zápisu s konkrétními daty při výpočtu osvětlení, protože na základě výše zmíněných kritérií bylo vytvořeno více než 87 tisíc záznamů.

Ze sloupce s časem ve formátu RRRR-měs-DD HH:MM, kde „měs“ je třípísmenná zkratka anglického názvu měsíců a ostatní údaje jsou číslice, byly vytvořeny sloupce pro každý údaj zvlášť. Selenografická délka a šířka subsolárního bodu ve stupních byla ponechána beze změny. Vzdálenost mezi Sluncem a Měsícem je v datech zapsána v astronomických jednotkách a bylo nutné ji tedy přepočítat na vzdálenost v metrech. Údaj *range-rate*, který popisuje velikost změny vzdálenosti mezi jednotlivými záznamy, nebyl využit. Data byla rozdělena do souborů po jednotlivých měsících, které se jmenují podle schématu RRRR-M(M), kde rok i měsíc jsou vypsány číslovkou a měsíc je občas dvojčíselný. V prvním sloupci souboru je vždy den, v dalším hodina, ve třetím selenografická délka subsolárního bodu, ve čtvrtém selenografická šířka subsolárního bodu a v posledním aktuální vzdálenost Měsíce od Slunce v metrech. Data jsou oddělena středníkem a jsou uložena ve formátu *.csv. Celkem bylo vytvořeno 121 souborů s průměrně 720 záznamy na soubor. Pro konkrétní datum je pak otevírán vždy příslušný soubor, který je pročitán po řádcích od začátku, dokud se neshoduje den a hodina. Tyto soubory jsou uloženy ve složce *data*, která se musí nacházet ve stejném umístění jako skript *LunarIrradiance.py*, protože je na data odkazováno relativní cestou.

4.6 Popis a funkčnost výsledného skriptu

Výsledkem práce, jak již bylo uvedeno v předešlých kapitolách, je spustitelný skript, který na základě vložených dat modeluje osvětlení v daném místě měsíčního povrchu. V této kapitole jsou rozebrány jednotlivé části tohoto skriptu a ten je k práci přiložen jako příloha č. 1. Na CD je pak vložen včetně *ArcToolboxu*, který zprostředkovává uživatelské rozhraní, funkčnost a vstup dat pod programem *ArcMap*. Přiložena je také složka obsahující data efemerid od 1. 1. 2010 do 1. 1. 2020 po jedné hodině, jak je rozebíráno v předešlé kapitole.

Kód je pro přehlednost barevně členěn. Komentáře jsou zobrazeny červenou barvou a v jazyce Python jsou vždy uvozeny znakem #. Textové řetězce jsou zobrazeny zelenou barvou. Funkce jazyka, jako větvení či cykly, jsou zobrazeny oranžovou barvou. Modrou jsou vyznačeny názvy definovaných funkcí a fialovou datové typy a integrované funkce jazyka.

Nejprve jsou v rámci skriptu naimportovány využité externí moduly jazyka python. Jedná se o modul „*math*“, který zprostředkovává pokročilejší matematické funkce, dále moduly „*time*“ a „*datetime*“, které umožňují práci s časem, systémové moduly „*os*“, „*sys*“ a „*shutil*“, které umožňují operace s externími soubory, a také samotný modul „*arcpy*“. To je základní modul od firmy ESRI, který pracuje se všemi funkcemi programu *ArcMap* a pomocí něhož je možné provádět geografické analýzy, konverzi dat, data management a automatizaci mapové tvorby. (ESRI, 2012b) Protože některé funkce je možné využívat pouze po zakoupení rozšíření, tzv. extenzí, je před využitím těchto funkcí potřeba otestovat, zda jsou příslušné extenze zakoupeny. V tomto skriptu jsou využity extenze „*3D analyst*“ a „*spatial analyst*“.

Skript je následně rozdělen do 5 funkcí, které představují jednotlivé logické celky a budou dále podrobně rozebrány. Jedná se o funkci „*Astrodata*“, která dle zadaného času a data načítá příslušné hodnoty z dat *JPL Horizons*. Dále je to funkce „*projection*“, která vytváří stereografickou projekci s kartografickým počátkem v centru vstupních dat. Třetí funkcí je funkce „*filt*“, pomocí které jsou filtrována vstupní data. Další funkcí je „*reflect*“, která počítá odražené záření. Poslední a hlavní funkcí je funkce „*visible_point*“. Ta je při volání skriptu spuštěna a dle zadaných parametrů volá všechny ostatní funkce a počítá samotné zastínění vstupních bodů okolním reliéfem a výslednou intenzitu ozařování. Pod každou funkcí je v rámci skriptu v angličtině popsáno, jaké jsou vstupy a výstupy funkce a co funkce dělá.

a) Funkce astrodata

Tato funkce je sestavena z poměrně přímočarého kusu kódu, který funkčně navazuje na skript *JPLSplit.py*, který je přílohou č. 2. Jediným vstupem funkce je textový řetězec zvoleného data ve formátu „dd.mm.yyyy hh:nn:ss“ (d – den, m – měsíc, y – rok, h – hodina, n – minuta, s – sekunda), což je výstupní formát času a data z prostředí ArcToolboxu. Tento textový řetězec je ve funkci rozdělen nejprve dle mezery na datum a čas. Z času je pak dle dvojtečky oddělena hodina a minuty a sekundy jsou zanedbány. Při zadávání je tak vhodné vkládat pouze celé hodiny, protože čas není zaokrouhlován, a na minuty a sekundy tak není brán zřetel. Datum je dle tečky následně rozděleno na příslušný den, měsíc a rok.

Z roku a měsíce je vytvořen název souboru s příslušnými daty, který je následně otevřen z podsložky „.\data\“. Jedná se o relativní umístění, proto tato složka musí být umístěna ve stejném adresáři jako spouštěný skript. Otevřený soubor, jehož struktura byla popsána v kapitole 4.5, je pak čten po řádcích. Když se shoduje den a hodina, jsou do proměnných uloženy hodnoty selenografické šířky a délky subsolárního bodu a vzdálenost mezi Měsícem a Sluncem a čtení je ukončeno.

Z těchto dat je pak vypočtena solární konstanta, jak bylo popsáno v kapitole 3.1a). Výstupem z funkce je pak tato hodnota solární konstanty, vzdálenost Slunce-Měsíc, kvůli využití v dalších výpočtech i čtvercová vzdálenost Slunce-Měsíc a souřadnice subsolárního bodu.

b) Funkce projection

Funkce *projection*, jak název napovídá, vytváří předpis pro stereografickou projekci se souřadnicemi kartografického pólu v centroidu vstupních dat. Jsou k tomu využity dvě funkce modulu *ArcPy*. Nejprve je nad vstupními daty spuštěna funkce *Minimum bounding geometry*, která vytvoří polygon opsaný vstupními daty. Představuje tak plochu, na které jsou vstupní data rozprostřena.

Na tento polygon je pak aplikována funkce *Feature to point*. Ta převede tento polygon na bod, který je v jeho těžišti. Lze ho tedy považovat za střed území reprezentovaného vstupními body. Pomocí kurzoru, což je přístupový objekt, který prochází data po řádcích a vrací požadované hodnoty z tabulky, jsou získány souřadnice tohoto bodu v původním geografickém souřadném systému *GSC_Moon*. Jedná se tedy o selenografickou šířku a délku.

Z těchto bodů je pak vytvořen název pro jednoznačnou identifikaci tohoto zobrazení ve formátu „*Stereographic_moon_ss_dd*“, kde *s* je selenografická šířka a *d* je selenografická délka kartografického pólu ve stupních.

Název a souřadnice bodu jsou pak vloženy na příslušné místo do textového řetězce, který definuje souřadný systém. V něm je v dané struktuře definováno referenční těleso jeho reprezentací, poloměrem či poloměry, zvoleným základním poledníkem a úhlovými jednotkami a dále typ zvolené projekce, souřadnice středu a zvolené délkové jednotky.

Tento textový řetězec je pak prvním výstupem této funkce. Vstupní data tedy nejsou v rámci této funkce přepočítána do nové projekce. Druhým výstupem je selenografická délka základního poledníku, která je dále využita pro přepočet souřadnic subsolárního bodu.

c) Funkce filt

Tato funkce filtruje, tedy maže, body s vyšším než prahovým rozdílem výšky povrchu od shlazeného povrchu, jak bylo popsáno v kapitole 4.3. Vstupními daty je jak vrstva okolních bodů tzv. „*surrfc*“ (z angl. surrounding feature class – okolní vrstva), tak vstupní vrstva měřených bodů „*infc*“ (z angl. input feature class – vstupní vrstva), výstupní vrstva finálních bodů „*outfc*“ (z angl. output feature class – výstupní vrstva) a pomocná liniová vrstva. Dalšími vstupy jsou prahová hodnota a velikost průměrové mřížky, které uživatel zadává přímo jako vstup v uživatelském prostředí *ArcToolboxu*.

Protože se předpokládá, že data vstupní vrstvy bodů *infc* jsou vybrána z většího množství bodů okolní vrstvy *surrfc*, a jsou tedy s příslušnými body této vrstvy totožná, je rastrový digitální model terénu, který je dále k filtraci potřeba, vypočítán pouze z vrstvy *surrfc*. K vytvoření tohoto modelu terénu je využita funkce *Topo to raster*, která je původně navržena pro vytváření hydrologicky korektního modelu terénu. Bylo tedy nutné nastavit, aby funkce automaticky nezaplňovala bezodtoké oblasti, protože měsíční krajina na rozdíl od té pozemské není formována vodou v kapalném stavu.

Na tento model terénu je následně aplikován nízkofrekvenční průměrový filtr v podobě funkce *Focal statistics* extenze *Spatial analyst*. Ten projde rastr pixel po pixelu a každému přiřadí hodnotu, která odpovídá průměru z okolních buněk ve zvolené mřížce. Například při velikosti mřížky 5x5 zprůměruje hodnotu z 25 okolních pixelů a tu dané buňce přiřadí. Vstupní číslo tedy musí být liché číslo větší nebo rovno třem. Čím vyšší číslo je zadáno, tím více je povrch shlazen.

Pomocí funkce *Extract multi values to points* je následně každému bodu vrstvy okolí i vstupní vrstvy do nového pole atributové tabulky přiřazena hodnota, která odpovídá hodnotě příslušné buňky shlazeného rastru. Je vypočítán rozdíl mezi touto hodnotou a skutečnou výškou povrchu každého bodu. Pokud je rozdíl vyšší než prahová hodnota, bod je funkcí *Select by attribute* označen. Funkcí *Select by location* jsou pak označeny příslušné body a linie z vrstvy *outfc* a z pomocné liniové vrstvy a následně jsou všechny označené prvky funkcí *Delete features* smazány.

Funkce tedy nemá žádný výstup, ale upravuje přímo vstupní data. Aby nebyla upravována primární vstupní data skriptu, je tato funkce spouštěna až po projekci do nového zobrazení, protože při projekci je vytvářen nový soubor.

d) Funkce *reflect*

Funkce *reflect* počítá pro každý bod intenzitu ozařování odraženým zářením z okolních povrchů. Protože výpočet může být poměrně časově náročný, je nejprve vypočten a zobrazen čas začátku výpočtu pomocí zpráv v okně, které zobrazuje průběh skriptu.

První využitou funkcí je již zmiňovaná funkce *Topo to raster*, která počítá digitální model reliéfu z vrstvy okolních bodů. Protože je třeba znát, které plochy jsou osvětleny a které ne, je na tento digitální model terénu aplikována funkce *Hillshade*, která vytváří stínovaný reliéf i se stíny okolních objektů na základě hodnot výšky Slunce nad obzorem a azimutu. Pro výpočet osvětlení či zastínění jednotlivých buněk rastru by mohl být využit i algoritmus popisovaný v následující funkci, ale pro výpočet odraženého záření postačí jednodušší a výpočetně méně náročný postup funkce *Hillshade* i s jeho zjednodušeními. Tento rastr je pak funkcí *reclassify* převeden na binární rastr. Dále jsou spuštěny funkce *Slope* a *Aspect*, které nad digitálním modelem terénu vypočítají sklonitost a orientaci pro každý pixel.

Následně je pomocí kurzoru procházena vrstva vstupních bodů a všechny další kroky jsou vytvářeny pro každý bod vstupní vrstvy. Nejprve jsou zjištěny souřadnice bodu a z nich je vytvořena bodová geometrie, která je následně využita ve funkci *Viewshed*. Tato funkce počítá opět nad digitálním modelem terénu viditelnost okolních ploch ze zadaného bodu. Pro urychlení funkce je využito možnosti uložení dat „*in_memory*“, kdy se data neukládají na lokální disk, ale jsou uchována v operační paměti počítače, která je několikanásobně rychlejší. Má ale většinou menší kapacitu, takže je dobré tuto funkci využívat pouze u menších dočasných souborů, které je třeba v rámci výpočtu vytvořit, ale

kteřé budou v časově blízkém horizontu z paměti odstraněny, aby neomezovaly výpočetní prostor počítače.

Pomocí funkce násobení rastrů jsou pak rastry *hillshade*, *viewshed* a *toporaster* vynásobeny a výsledek je uložen do paměti. Protože první dva zmíněné rastry jsou binární, tedy jejich hodnota je buď 1 nebo 0 (u rastru *hillshade* jde o osvětlené či zastíněné plochy a u rastru *viewshed* o plochy z daného místa viditelné, či nikoliv), výsledkem násobení je buď 0, v případě že jakýkoliv z rastrů má hodnotu 0, či výška povrchu v případě že rastry *viewshed* i *hillshade* mají hodnotu 1. Výsledný rastr tak představuje výšku povrchu osvětlených ploch, které jsou z měřeného místa viditelné.

Tento rastr je pak převeden na matici pomocí funkce *Raster to numpy array* a z paměti jsou odstraněny již nepotřebné rastry. Je zjištěn počet řádků a sloupců této matice a také souřadnice levého horního rohu rastru a velikost buňky. Z rastrů sklonu a orientace je pomocí funkce *Get cell value* načtena hodnota orientace a sklonu plochy ve které se nachází měřený bod, a z těchto hodnot je vypočítán normálový vektor této roviny, jak je popsáno v kapitole 3.2c).

Následně je procházena matice hodnot výšek povrchu osvětlených viditelných ploch a pro každý nenulový člen je z prostorových souřadnic spočítána vzdálenost k měřenému bodu. Na základě druhé mocniny této vzdálenosti, průměrné odrazivosti a průměrné hodnoty intenzity ozařování okolních povrchů, což jsou jedny ze vstupů do této funkce a o jejich výpočet se stará funkce *visible_point*, je vypočítána hodnota intenzity ozařování v ploše kolmé na směr záření. Je vypočítána odchylka normálového vektoru roviny a vektoru směru záření a hodnota intenzity ozařování je vynásobena cosinem této odchylky, jak je popsáno v kapitole 3.2c). Výsledek je pak postupně sčítán pro všechny okolní osvětlené viditelné plochy a tato suma je zapsána do pole „*reflect*“ v atributové tabulce výsledné bodové vrstvy *outfc*.

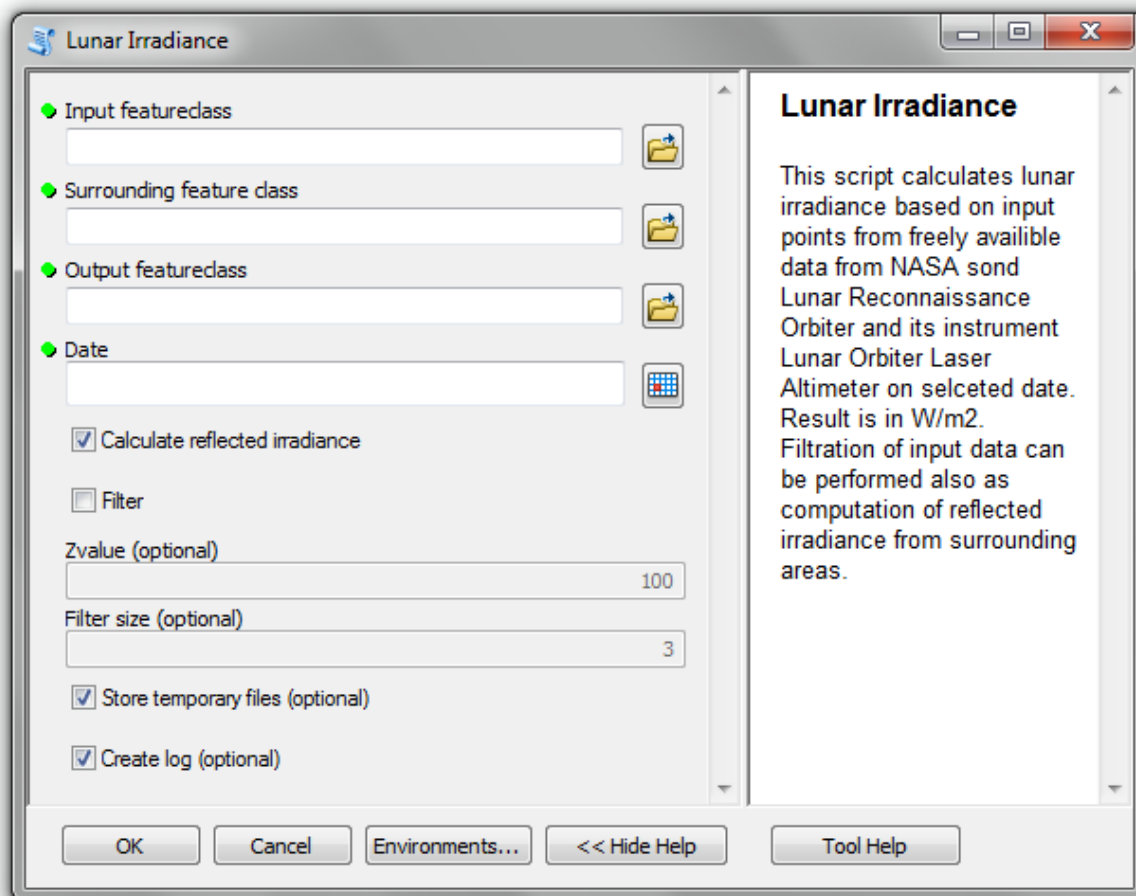
e) Funkce *visible_point*

Funkce *visible_point* je hlavní funkcí celého skriptu. V rámci této funkce jsou volány všechny ostatní. Po spuštění skriptu z prostředí *ArcToolboxu* je zavolána tato funkce se vstupními parametry, které jsou zadány. Ty jsou do skriptu vloženy pomocí funkce modulu *arcpy* *Get parametr as text*, která tak propojuje uživatelské prostředí programu *ArcMap* s programovacím jazykem Python.

Vstupních argumentů je celkem deset. Seřazeno postupně se jedná za prvé o cestu k souboru vstupní vrstvy *infc*, dále cestu k souboru vrstvy okolních bodů *surrfc*, za třetí cestu k výstupnímu souboru *outfc*, který bude v rámci skriptu vytvořen, dále datum a čas,

ve kterém je požadováno osvětlení modelovat. Pátým vstupem je binární hodnota *reflect_value*, čili možnost pravda či nepravda, zda uživatel požaduje počítat odražené záření. Stejně tak je to s možností *filter_value*, označující, zda bude spuštěna filtrace dat. V rámci prostředí *ArcToolboxu*, které je vidět na Obr. 23, lze nastavit možnost zadávat určité vstupy pouze v případě, že jiné vstupy nabývají nějakých určitých hodnot. Toho bylo využito v případě dalších parametrů *zvalue* a *pix*, tedy prahové hodnoty a velikosti mřížky využitě při filtraci, které lze zadávat pouze v případě, že uživatel zvolí kladně předchozí možnost, tedy že si přeje data filtrovat. Zadávání těchto hodnot by totiž v případě, že filtrace nebude využita, nemělo žádný smysl. Posledními dvěma parametry je volba zachování dočasných souborů vytvořených v průběhu skriptu a volba vytvoření souboru záznamů *log*. Obě možnosti jsou binárního typu, a možnost *log* je možné využít, pouze pokud je využita možnost zachování dočasných souborů, protože záznamový soubor je ukládán do vytvořené dočasné složky.

Obr. 23 – Formulář skriptu pro vkládání dat v prostředí ArcToolbox



Jednou z prvních věcí vykonaných v rámci skriptu je zaznamenání počátečního času a definování ukazatele postupu. Protože analýza může být časově náročná, je dobré

uživatele informovat o dosaženém postupu, aby bylo možné odhadnout, v jaké fázi výpočtu se nachází. K tomuto účelu jsou využity funkce *Add message* a *Set progressor*, které přidávají zprávy do dialogového okna a mění typ a pozici ukazatele postupu. Jsou za účelem informování uživatele používány v rámci celého skriptu.

Nejprve je ve složce, která byla zvolena jako cílové umístění výsledného souboru, vytvořena nová podsložka pro ukládání všech dočasných souborů potřebných k vykonání skriptu. Ta má formát „temp_ddmmyyy_hhnn“, kde jednotlivé zkratky mají stejný význam jako v popisu funkce *astrodata*. Pokud takováto složka již existuje, je na konec přidávána číslice 1, dokud jméno není jedinečné. Pokud není zvolena možnost zachování dočasných souborů, je celá tato složka na konci skriptu odstraněna. Tato složka je zvolena jako tzv. *environment workspace*, tedy pracovní prostředí, a proto všechny vytvořené soubory v rámci modulu *arcpy*, pokud nemají specifikovanou absolutní cestu, jsou ukládány do této složky. Pokud je zvolena možnost *log*, je v této složce vytvořen soubor *Log.csv* a je do něj zapsán čas spuštění skriptu, vstupní parametry a počet bodů ve vstupní a okolní vrstvě.

Dále je pomocí funkce *Create featureclass* vytvořena výstupní vrstva dle zadané cesty. Pokud tento soubor již existuje, je nejprve smazán. Do atributové tabulky této vrstvy jsou přidány dvě pole a to „delta“, ve kterém bude pro každý bod uložena výška Slunce nad obzorem v radiánech, a pole „LEST“, ve kterém bude zapsána výsledná intenzita ozařování. Dále je vytvořena pomocná liniová vrstva *lin*.

V této chvíli je zavolána funkce *astrodata* a výsledné hodnoty jsou uloženy do příslušných proměnných. Dále je vytvořeno nové zobrazení, jak je popsáno v kapitole popisující funkci *projection*. Kvůli rozdílným intervalům souřadnic v datech (data selenografické délky jsou v intervalu od 0 do 360, kdežto u bodů je tato hodnota v intervalu -180 až 180) je poté přepočítána selenografická délka subsolárního bodu. Ta je stanovena tak, aby azimut linie z této délky dále vypočítaný měl správnou hodnotu, a linie tak byla orientovaná směrem, kterým je Slunce nejbližší. Pro to je využita hodnota základního poledníku vytvořeného zobrazení. Pro výpočty je pak selenografická šířka a délka subsolárního bodu převedena na radiány a je definován poloměr Měsíce a délka vytvářených linií.

Následně je pomocí kurzoru procházena vrstva vstupních bodů a pro každý bod je spočítána výška Slunce nad obzorem, jak je popsáno ve vzorci 3.3.1, a je uložena do pole „delta“. Dále jsou získány zeměpisné souřadnice bodu a ke každému bodu je vytvořena linie vedoucí z těchto souřadnic do souřadnic subsolárního bodu. Tato linie tak představuje směr šíření slunečních paprsků. Ke každé linii je připojena hodnota doplňkového úhlu výšky Slunce nad obzorem, který je dále využíván ve výpočtech. Pokud

uživatel zvolí možnost výpočtu odraženého záření, je v každém bodě spočítána odrazivost z hodnoty navrácené energie laserového paprsku, tak jak je popsáno v kapitole 3.2b). Také je zaznamenána hodnota výšky Slunce nad obzorem.

V další části jsou vrstvy *infc*, *surrfc*, *lin* a *outfc* zobrazeny z původního geografického systému souřadnic do stereografické projekce. K tomuto účelu je využita funkce *Project*, která dle zobrazovacích rovnic jednotlivých zobrazení, jak je definuje ESRI, přepočítá souřadnice a výsledek uloží do nového souboru. Nemění tedy původní vstupní data. Výsledky jsou uloženy v dočasné složce.

Následuje filtrace dat, pokud ji uživatel zadal. Je provedena pouze tehdy, pokud má vrstva okolních bodů více záznamů než 50, protože v menším počtu nemá smysl data filtrovat. Pokud jsou při filtraci vymazány všechny body vstupní vrstvy, je celý skript chybovou hláškou ukončen a je třeba změnit vstupní parametry filtrace, vybrat jiné vstupní body či filtraci vynechat.

Dále je vytvořena nová vrstva linií. Pomocí kurzoru je procházena původní vrstva linií *lin*, která byla převedena do souřadného systému stereografické projekce. Jsou získány souřadnice obou koncových bodů této linie a je spočítána oprava výšek povrchu počátečního bodu, jak je popsáno v kapitole 4.4. Ze souřadnic je vypočítán azimut každé linie. Následně je v nové vrstvě linií vytvořeno pro každou původní linii osm nových, které reprezentují Slunce jako kruhovou plochu, tak jak je popsáno v kapitole 3.1d). Jejich počáteční bod je posunut o jeden metr nad povrch a koncový bod je vypočítán pro každou linii pomocí rovnic převodu sférických souřadnic na pravoúhlé ze vzorce 3.3.3.

Poté je procházením všech bodů vrstvy okolních bodů *surrfc* pomocí kurzoru provedena oprava výšek povrchu, jak je popsáno v kapitole 4.4. Následně je z těchto bodů vytvářen digitální model povrchu. Vytváření modelu ve formě TIN z většího počtu bodů může být však poměrně časově náročné. Protože linie osvětlení směřují zpravidla podobným směrem, není třeba vytvářet model terénu ze všech okolních dat. Jsou tedy vybrány pouze body, jež jsou pro analýzu relevantní. K tomu je využita funkce *Minimum bounding geometry*, která vytvoří polygon prostorově ohraničující vrstvu linií osvětlení. Následně jsou z vrstvy *surrfc* vybrány funkcí *Select by location* pouze body, které odpovídají této výseči. Model terénu je pak vytvořen pouze z těchto vybraných bodů, a to funkcí *Create TIN*.

V této fázi nastává samotný výpočet průniku prostorových linií s modelem terénu. To zprostředkovává funkce *Intersect 3D line with surface* extenze *3D analyst*. Ta každou linii v každém případném průniku s modelem terénu rozdělí na dvě části. V atributové

tabulce pak výsledná vrstva má dvě pole, a to „*surf_from*“, název modelu terénu, ze kterého vychází, a „*surf_to*“, název modelu terénu, ve kterém končí. Takováto zdánlivě složitá konstrukce je vytvořena proto, že funkce umožňuje vložit do analýzy více než jeden model terénu. Z výsledných linií byly vybrány ty, které mají atribut „*surf_from*“ roven prázdné buňce, což značí, že se jedná o první linii vycházející z měřeného bodu. Ve výsledku tak vznikne opět osm linií z každého bodu.

Ještě před finálním výpočtem osvětlení je proveden výpočet odraženého záření. Pokud je zvolena kladně vstupní hodnota *reflect_value* je spočítána průměrná odrazivost a průměrné dopadající záření na okolní plochy. S těmito hodnotami a s hodnotami azimutu a výšky Slunce nad obzorem je spuštěna funkce *reflect* tak jak je popsána v předešlé kapitole.

V poslední části skriptu je počítána intenzita ozařování v horizontálním směru tzv. LESI, jak byla nazvána Li a kol. (2012). Kurzorem je procházena vrstva linií vycházejících z měřeného bodu a je zjišťován atribut „*surf_to*“. Pokud tento atribut je roven jménu digitálního modelu terénu, linie má s modelem alespoň jeden průnik a znamená to, že je zastíněná. Pokud je tento atribut prázdný, žádný průnik s modelem terénu není. V takovém případě je spočítána dle vzorce 3.3.4 hodnota LESI úměrná výšce Slunce nad obzorem pro každou z osmi linií a do atributové tabulky je zapsán součet všech těchto osmin pro daný bod.

V ojedinělých případech se může stát, že je výška Slunce nad obzorem záporná a bod přesto nemá s modelem terénu žádný průnik. Jedná se pak buď o bod, který je pod povrchem modelu terénu a neměl by být zařazen do analýzy, anebo pokud je území v polárních oblastech Měsíce, může se jednat o trvale osvětlený bod. V obou případech je nutná manuální kontrola takového bodu. Ve výsledném poli je označen symbolickou hodnotou -0,1.

Na závěr jsou uvolněny zámky vytvořené kurzory na upravovaných souborech, a pokud není využita možnost zachování dočasných souborů, je smazána složka „*temp*“.

5. Diskuse nad výsledky

V kapitole 2.3 byly vypsány cíle práce, které byly v rámci předchozích kapitol řešeny. V této kapitole budou výsledky představeny či zdůrazněny a budou přiloženy obrazové výstupy z vytvořeného skriptu.

Jedním z prvních výsledků představených v práci je zhodnocení vlivu vypočítané intenzity ozařování od Země, a to jak zářením Zemí emitovaným, tak slunečním od Země odraženým. Na základě zjištěných hodnot, které jsou vypočítány ve vzorcích 3.1.5 a 3.1.6, bylo rozhodnuto o malém vlivu těchto dvou faktorů, které proto nebyly zahrnuty do výsledného algoritmu. Záření zemí emitované je o více než čtyři řády menší než přímé sluneční záření a navíc jeho většina je vyzařována ve vlnových délkách infračerveného spektra. Odražené sluneční záření od Země je trochu významnější i tím, že jeho maximum je ve viditelném spektru, ale jeho maximální možná hodnota nedosahuje ani 1% přímého slunečního záření. Vliv těchto složek například na výrobu elektrické energie ve fotovoltaických panelech je proto minimální. Stejně tak bylo rozebráno záření od vzdálených hvězd výpočtem intenzity ozařování z hvězdy Sirius, která, ač se jedná o nejjasnější hvězdu na obloze, je o více než 11 řádů menší než intenzita přímého slunečního záření. Pro výpočet intenzity ozařování Sluncem byl vytvořen předpis, který počítá aktuální solární konstantu ze vzdálenosti Slunce – Měsíc, a zachycuje tak její proměnlivost.

Hlavním výsledkem je však skript pro výpočet intenzity ozařování v libovolném místě na měsíci. Jak bylo popsáno, skládá se z několika částí, které jsou dále jednotlivě rozebrány. Vytváření zobrazení a princip pracování s efemeridy byl podrobně popsán v předchozích kapitolách a tyto výsledky nejsou velmi proměnlivé v závislosti na zadaných vstupech. Proto bude rozebráno především filtrování dat a vliv zadaných parametrů na výsledek, výskyt částečného zastínění, výsledky odraženého záření a nakonec výsledky výpočtu přímého záření.

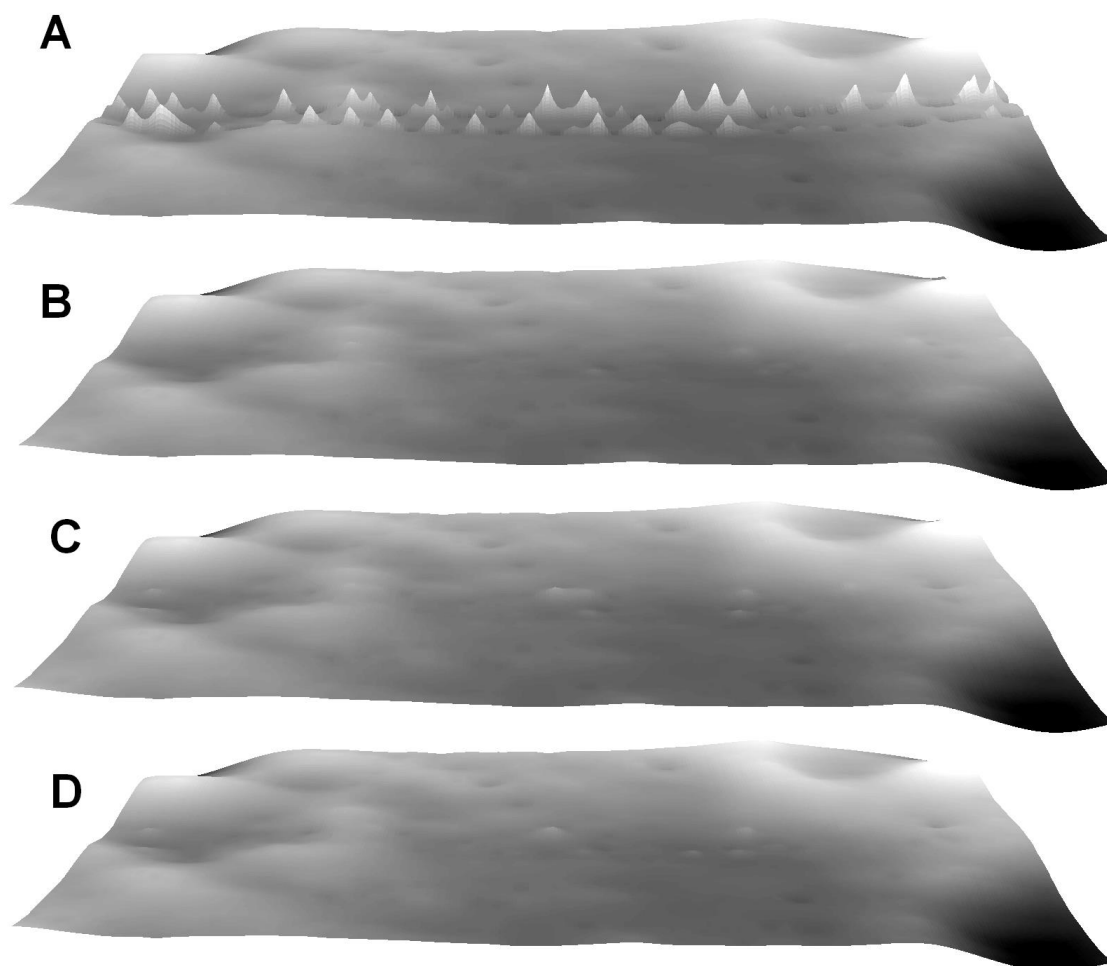
5.1 Výsledky filtrace

Jak bylo diskutováno v předešlých kapitolách, v datech se často objevují výškově chybná data. Jednou z možností, jak se s těmito nepřesnostmi vyrovnat, je využití filtrovacího algoritmu. Do modelu je začleněn jednoduchý postup, který je schopen, některé chybné hodnoty odstranit. Avšak pro jistotu bezchybnosti dat je určitě dobré využít nějaký ze specializovaných programů či postupů ještě před spuštěním algoritmu a používat tak data už stoprocentně správná. Pro menší nepřesnosti je však možné vložený algoritmus využít.

Protože hodnocení úspěšnosti filtračního algoritmu není prioritním cílem této práce, bude ukázán jeden případ použití filtrace nad syrovými daty a budou popsány zadané parametry.

V prvním případě je filtrace ukázána na území 52° severní šířky a 27° západní délky. Filtrace byla spuštěna celkem 9 krát s různými parametry. Prahová hodnota *zvalue* byla stanovena na 100, 50 a 20 metrů a pro každou z těchto hodnot byly vypočítány tři shlazené rastry mřížkou 3x3, 7x7 a 15x15 pixelů. Digitální model terénu vytvořený z původních dat je spolu s modely terénu dat po některých vybraných filtracích vidět na Obr. 24.

Obr. 24 – Modely terénu před a po filtraci



A – původní data; B – *zvalue* = 100, *pix* = 15; C – *zvalue* = 50, *pix* = 7; D – *zvalue* = 20, *pix* = 3

Jedním z nejlepších nastavení byl případ B. U dalších případů, tedy např. C a D, jsou stále vidět některé pozůstatky chybných dat. Dalším poměrně úspěšným nastavením byla hodnota *zvalue* 50 a *pix* 15. Toto nastavení produkovalo skoro totožné výsledky jako případ B. Nicméně lze obecně pro tuto lokaci říci, že větší význam na výsledky filtrace

měla velikost mřížky, tedy hodnota *pix* než prahová hodnota. Při vyšších hodnotách mřížky jsou však shlazeny i některé správné extrémní hodnoty, například dno kráteru. Tento efekt se ještě zvyšuje s menší prahovou hodnotou.

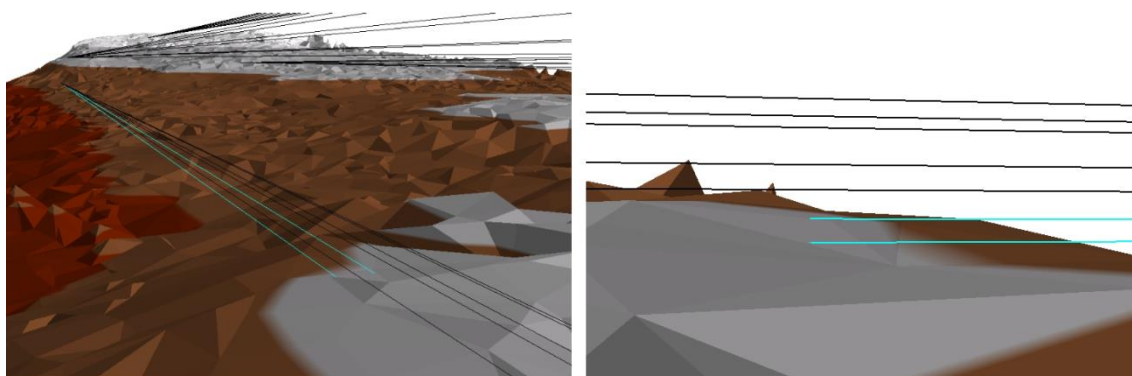
Vhodné parametry pro filtraci se však mění s vlastnostmi filtrovaných dat. Na rozsáhlejších územích, či při vyšší hustotě bodů, kdy bude do jedné buňky spadat více hodnot, budou vhodné parametry jiné, než pro data s menší hustotou. Pokud budou chybná data spíše ojedinělá a budou mít velký výškový rozdíl oproti ostatním hodnotám, například měření s vícenásobným odrazem, postačí i vyšší prahová hodnota a menší velikost mřížky. Bude tak odfiltrováno jen několik nejvíce extrémních hodnot a model terénu bude dobře reprezentovat skutečný povrch. Pokud však budou chybná měření systematická, a tyto hodnoty budou blízko sebe, bude třeba aplikovat větší mřížku i za cenu ztráty správných dat.

Jedním z pozorovaných negativních efektů tohoto postupu, je odfiltrování hodnot dna kráterů, které jsou v upravených datech zploštěny. To je ovlivňováno především velikostí mřížky. Čím je mřížka větší, tím je zploštění znatelnější.

5.2 Hodnocení částečného zastínění a odraženého záření

Jak bylo psáno v kapitole 3.1d) částečné zastínění může výrazně ovlivnit výslednou hodnotu intenzity ozařování, a proto je Slunce v algoritmu reprezentováno diskem, respektive 8 liniemi po obvodu tohoto disku. Jak vyplývá z logiky věci, k částečným zastíněním bude docházet, pouze pokud bude Slunce blízko horizontu. Čím dále od rovníku je měřené místo, tím déle také Slunce blízko horizontu setrvává.

Obr. 25 – Částečné zastínění



V průběhu testování a vytváření skriptu bylo zaznamenáváno částečné zastínění poměrně často. Na Obr. 25 je jeden z těchto případů zachycen. Světlem modrou barvou je zvýrazněna linie, která protíná digitální model terénu, a jí reprezentovaná část slunečního

kotouče je tak zastíněná. Černou barvou jsou zobrazeny ostatní linie viditelnosti. Ostatními barvami je zobrazen digitální model terénu ve formě TIN. Obrázek mimo jiné dobře simuluje grafické znázornění principu výpočtu, tedy prostorový průnik linií osvětlení s TIN. Tato konkrétní simulace proběhla nad daty z území okraje Shackletonova kráteru na jižním pólu Měsíce. Vstupní vrstvou do algoritmu bylo devět bodů a dva z nich mají částečné zastínění. Podrobnější informace k výsledkům z této simulace poskytuje Tab. 5, která je exportem atributové tabulky výsledné vrstvy.

Tab. 5 – Výsledky ozařování při částečném zastínění včetně odraženého záření

Bod	Delta	LESI	Reflect
1	0,0250	33,08	0,0070
2	0,0248	0,00	0,0891
3	0,0250	0,00	0,0058
4	0,0248	20,57	0,0419
5	0,0248	16,42	0,0361
6	0,0246	32,66	0,0014
7	0,0245	32,52	0,0033
8	0,0246	0,00	0,0316
9	0,0249	0,00	0,0176

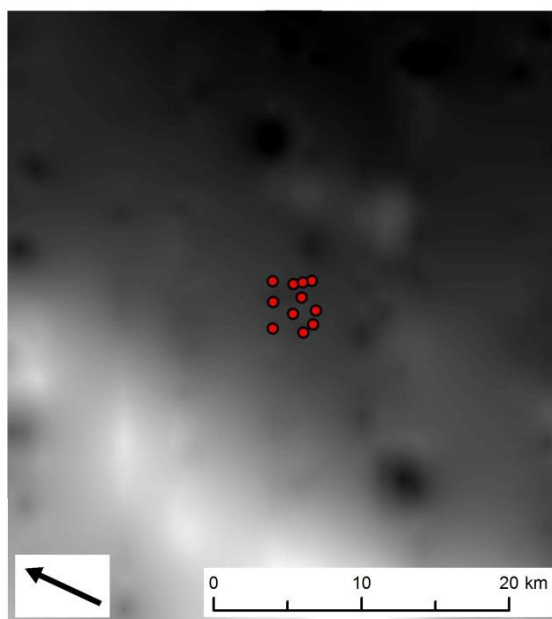
Zde sloupec *Delta* značí výšku Slunce nad obzorem v radiánech, sloupec *LESI* výslednou intenzitu přímého ozařování Sluncem a *Reflect* hodnotu odraženého záření. Protože přímé ozařování je počítáno v ploše nezávislé na digitálním modelu terénu, jsou mezi hodnotami bez částečného zastínění (1, 6 a 7) pouze drobné rozdíly, způsobené rozdílnou výškou Slunce nad obzorem pro jednotlivé body. Částečně zastíněné jsou pak body 4 a 5, přičemž u bodu 4 jsou zastíněny 4 linie z 8, a výsledkem je tedy polovina dopadajícího záření. U bodu 5 jsou zastíněné tři linie, a výsledkem je tedy 5/8 úplného osvětlení. Čtyři body jsou zastíněny zcela.

V poli *Reflect* je pak zaznamenána intenzita odraženého záření. Ta je značně proměnlivá, jen v této simulaci se pohybuje v rozmezí od 0,089 do 0,001 W/m². Protože velikost intenzity ozařování z konkrétní plochy je nepřímo úměrná čtverci vzdálenosti, mají na výslednou hodnotu zásadní vliv nejbližší plochy. Pokud ty jsou viditelné a osvětlené, je hodnota značně vyšší než například v případě, že jsou viditelné pouze osvětlené plochy vzdálenější, ač jich může být vyšší počet.

Další příklad hodnot odraženého záření je uveden v Tab. 6. Jedná se o lokaci 7° severní šířky a 12° východní délky, která je pro představu rozložení bodů a okolních ploch

zobrazena na Obr. 26. Zde jsou červenou barvou vyznačeny vstupní body a podkladem je rastrový model terénu. Šipka ukazuje směr slunečního záření.

Obr. 26 – Lokace pro výpočet odraženého záření



Tab. 6 – Výsledky odraženého záření

Bod	Delta	LESI	Reflect
1	1,22	1244,76	4,96
2	1,22	1244,71	7,84
3	1,22	1244,66	3,55
4	1,22	1244,93	3,78
5	1,22	1244,83	1,38
6	1,22	1244,91	1,43
7	1,22	1244,76	7,80
8	1,22	1244,82	4,16
9	1,22	1244,80	0,96
10	1,22	1244,82	1,52
11	1,22	1244,90	7,77

Jak je vidět, hodnoty odraženého záření jsou podstatně vyšší než v předchozím případě. To je dáno vyšší hodnotou průměrné intenzity ozařování rovinných ploch. Zatímco v minulém případě byla tato hodnota asi 32 W/m², teď, jak je z tabulky vidět, je asi 1244 W/m². Protože je však většina okolních ploch osvětlených, na rozdíl od předchozího případu, je vyšší i procentuální podíl. Zatímco v předchozím případě bylo průměrné odražené záření pouze 0,081 % přímé sluneční intenzity ozařování, v druhém

případě je hodnota asi 4 krát vyšší, tedy 0,33 %. Tak či tak se jedná o velmi nízké hodnoty, které nemají větší podíl na celkové intenzitě ozařování.

Je ale třeba zmínit jisté nedostatky výpočtu. Jedním z nich je procesní náročnost, která s ohledem na minimální významnost tohoto jevu, podstatně prodlužuje dobu výpočtu. Modelování odraženého záření pro větší množství bodů tak může být velmi zdoluhavé a pro více než 100 bodů není doporučováno.

Z teoretického pohledu jsou však důležitější především dvě zjednodušení. Tím prvním je zanedbání sklonu a orientace odrazivé plochy. Za předpokladu difuzního typu odrazu sice neovlivní geometrický princip výpočtu, jak bylo popsáno v kapitole 3.2c), ale ovlivní velikost intenzity vyzařování odraženého záření z této plochy. Protože ukloněná plocha svým úhlem a orientací směrem ke slunečním paprskům má vyšší intenzitu ozařování, je množství záření při zachování průměrné hodnoty odrazivosti vyšší, a naopak menší při opačných podmínkách. Tento efekt nebyl do modelu zahrnut především kvůli následnému dalšímu zvýšení procesní náročnosti.

Druhým zjednodušením, které ovlivňuje velikost výsledné intenzity, je předpoklad difuzního odrazu od povrchu, který nemusí být v reálných podmínkách splněn. Pokud by typ odrazu odpovídal spíše zrcadlovému nebo rýhovanému typu odrazu, mohou se hodnoty intenzity vyzařování prostorově měnit v závislosti na úhlu dopadu paprsků na odrazivou plochu až 3krát, u zvláště nerovných povrchů až 5krát. (Havelková, Pavelka, 2005)

Posouzení významu odraženého záření na Měsíci by kvůli těmto zjednodušením vyžadovalo další zkoumání a mohlo by být tématem pro další práci.

5.3 Vizualizace osvětlení

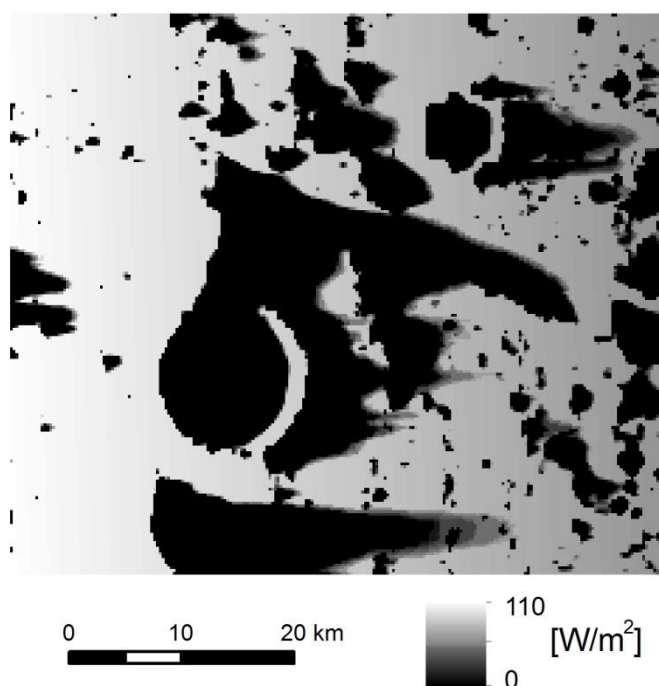
Hlavním výstupem výsledného skriptu může být tedy analýza osvětlení konkrétních bodů, které jsou například zvažovány pro výběr lunární základny či přistání modulu, jak je ukázáno výše. Z výsledků je pak pro zadaný čas pro konkrétní lokaci vypočítána hodnota intenzity ozařování přímého slunečního záření a případně odraženého záření. Přímé sluneční záření je počítáno pro rovinnou plochu, tedy pro plochu s nulovým sklonem. Pro jiné než rovinné plochy, například ukloněné solární panely, je třeba hodnotu přepočítat pro příslušné úhly.

Další variantou může být plošné znázornění osvětlení. Pokud ze syrových dat instrumentu LOLA vytvoříme pravidelnou mřížku, například pomocí interpolace, je možné

z výsledků sestavit rastr osvětlených ploch v dané lokalitě a čase, a z nich potom teprve podle dalších požadavků vybírat chtěná místa.

Tento postup byl aplikován na území 7° s. š. a 12° v. d. a výsledek je vidět na Obr. 27. Datum použité pro simulaci je 16. 8. 2014 a výška Slunce nad obzorem byla vypočítána na 2,7° nad obzorem. Výsledná intenzita ozařování je zde zobrazena ve stupních šedi od černé, nulová intenzita až po bílou, maximální v daném čase a na daném území, tedy asi 110 W/m². Odražené záření nebylo počítáno. Možností zobrazení těchto výsledků je samozřejmě více, například se nabízí vytvoření průhledného rastru pouze osvětlených ploch na podkladové mapě stínovaného digitálního modelu terénu.

Obr. 27 – Intenzita ozařování rovinné plochy



Na obrázku je dobře patrné částečné zastínění povrchu ve vrcholcích stínů od vyšších objektů. Nevýhodou takového zobrazení je, že při vyšších výškách Slunce nad obzorem je zpravidla osvětlen celý povrch a hodnoty intenzity ozařování jsou velmi podobné v celé ploše. Výsledkem je pak rastr s jednobarevnou výplní. Proto je dále popsán postup, který umožňuje vytvořit obrazy, které jsou vzájemně porovnatelné a dobře simulují reálný vzhled povrchu Měsíce.

Pro vizualizaci osvětlení povrchu, tak jak by se jevil například při průletu sondy nad povrchem, či na snímku z dalekohledu, je třeba nahradit při výpočtu intenzity ozařování rovinnou plochu plochou digitálního modelu terénu se správným sklonem a orientací. Na výsledném obraze pak jsou přivrácené ukloněné svahy osvětleny více, než

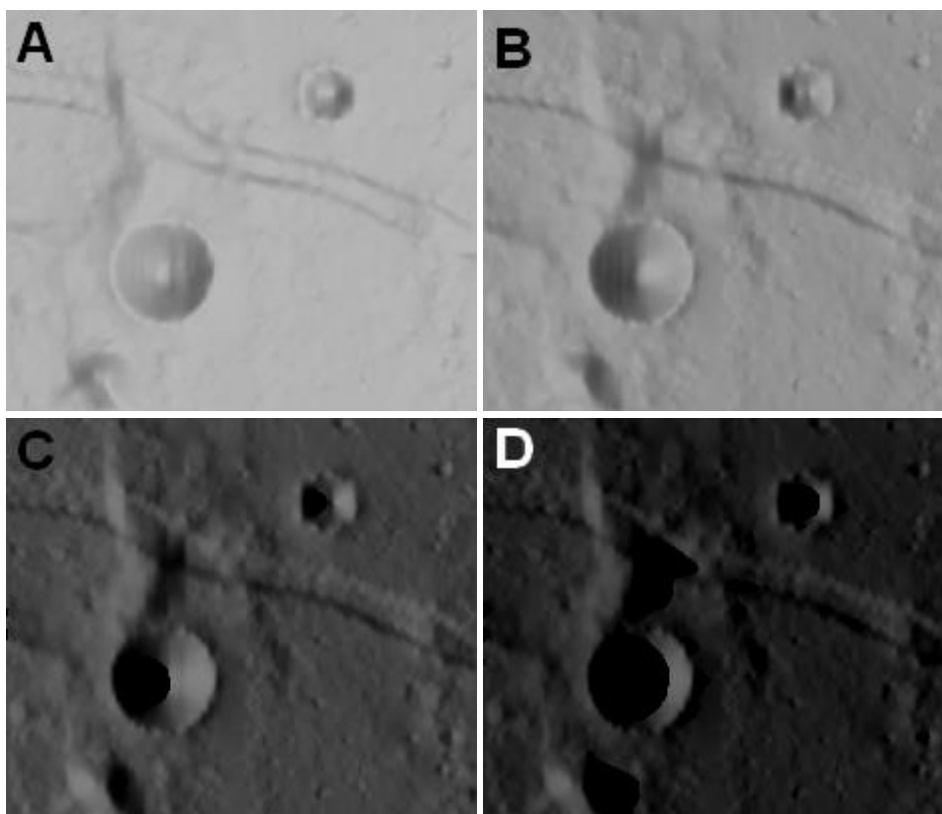
odvrácené. Výsledná hodnota intenzity ozařování této ukloněné plochy potom závisí na odchylce normálového vektoru této roviny od vektoru směru záření. Tyto vztahy jsou obdobné jako při rozebírání výpočtu odraženého záření ve vzorcích v kapitole 3.2c).

Pokud výpočet provedeme opět pro mřížku bodů s konstantními rozestupy, výsledek lze přepočítat na rastr. Aby bylo možno tento rastr jednoduše zobrazit a výsledné obrazy byly vzájemně porovnatelné, je vhodné využít některý z konvenčních formátů pro uložení obrazových dat, např. JPG či PNG. Takovéto rastry jsou většinou rozděleny na tři pásma, zobrazující jednotlivé barvy červenou, zelenou a modrou, a hodnota jednotlivých pixelů odpovídá intenzitě této barvy v dané bitové hloubce. Nejčastější je 8 bitová hloubka pro každé pásmo, čili 256 hodnot.

Pro takovéto uložení je třeba stanovit, jakou barvou bude reprezentován povrch s určitou intenzitou ozařování. Již při letném pohledu na měsíční disk je patrné, že rozličné typy barev se na povrchu měsíce většinou nevyskytují, ale jsou spíše omezené na stupně šedi. Šedá barva vzniká při rovnoměrném zastoupení všech barev tedy $R=G=B$ v (R,G,B) , kde R je červená, G je zelená a B je modrá. Proto byla za barvu odpovídající intenzitě 1400 W/m^2 , zvolena šedá s hodnotou 80 % maxima, pro 8 bitovou hloubku tak $(204;204;204)$. Tuto reprezentaci na základě vizuálně přívětivých výsledků navrhuje Schwarz (2012).

Pro vytvoření vizualizace osvětlení povrchu na Obr. 28 byl využit výše popsaný postup. Pro uložení obrázku ve formátu **.png* byla využita knihovna *Python Imaging Library*. Skript byl spuštěn nad stejným územím jako v předchozím případě, ale výpočet byl drobně upraven tak, aby hodnota intenzity ozařování byla počítána pro ukloněnou plochu digitálního modelu terénu. Výsledek byl uložen jako 8 bitový obrázek ve výše zvoleném formátu na popsaném barevném rozsahu. Simulace byla provedena několikrát pro různé dny a časy a výsledkem jsou tak různé světelné podmínky. Datum, čas a výška Slunce nad obzorem jsou popsány u každého obrázku. Měřítko je stejné jako v předchozím případě. Protože byl skript spuštěn mnohokrát a nad velkým objemem dat, byl kvůli časové úspoře skript zjednodušen na reprezentaci Slunce pouze jedním bodem, a nebylo počítáno ani odražené záření.

Obr. 28 – Vizualizace osvětlení povrchu



A: Datum: 8. 8. 2014 7:00, Výška Slunce nad obzorem: 69°

B: Datum: 12. 8. 2014 19:00, Výška Slunce nad obzorem: 52°

C: Datum: 14. 8. 2014 19:00, Výška Slunce nad obzorem: 27°

D: Datum: 15. 8. 2014 19:00, Výška Slunce nad obzorem: 17°

Na této soustavě obrázků je dobře vidět postupné ztmavování celého území, znamenající úbytek intenzity ozařování, a mezi snímky C a D je také vidět postup stínů objektů. Oproti předchozímu obrázku je tato vizualizace také podstatně plastičtější a dodává dojem reálného povrchu, nevýhodou je, že nelze přímo z obrazu odečítat hodnoty intenzity ozařování.

Pokud bude provedeno dostatečné množství simulací, a výsledné obrazy budou seřazeny v časové souslednosti, je možné vytvořit video, které bude simulovat postupný úbytek, nebo naopak nárůst intenzity ozařování v dané lokalitě s časem.

5.4 Zhodnocení algoritmizace

Jak bylo ukázáno v předešlých kapitolách, možností zobrazení výstupů je více. Pro správné použití funkce jsou většinou potřeba alespoň základní znalosti s uživatelským rozhraním programu *ArcGIS* a jeho s jeho funkcemi. Například k vytvoření mřížky bodů

pro výpočet rastru osvětlení je třeba využít několik dalších základních funkcí programu *ArcMap* a je třeba zachovat stejné zobrazení a strukturu atributů jako u syrových dat.

Jedním z nedostatků algoritmu je již zmiňovaná procesní náročnost. Její snížení by mohlo být dosaženo například parametrizováním podmínek pro určité výpočty. Například reprezentace Slunce 8 liniemi je v mnoha případech zbytečná a prodlužuje procesní čas.

6. Závěr

V této práci byl vytvořen nový postup pro výpočet intenzity ozařování povrchu Měsíce Sluncem. Byly diskutovány i další zdroje záření, ale ty nebyly kvůli nízkému vlivu do analýzy zahrnuty. Celý model byl zalgoritmizován v programovacím jazyce *Python* s využitím modulu *Arcpy* společnosti ESRI a výsledný skript, který je přiložen na CD, je spustitelný v programu *ArcMap*. Členěný programový kód je také přiložen přímo k práci jako příloha č. 1.

V práci byly nejprve teoreticky popsány fyzikální principy výpočtu intenzity ozařování, proměnlivost solární konstanty a vliv reprezentace zdroje záření na velikost výsledné hodnoty. Byl vytvořen nový postup výpočtu odraženého záření pro podmínky měsíčního povrchu, a tento postup je založen na prostorových vztazích modelovaných ploch. Také byla rozebírána odrazivost lunárního regolitu.

Dále byla v práci popsána využitá data a způsob jejich vzniku. Také byly popsány chyby, které se v datech vyskytují, a byl navržen a implementován možný postup pro odstranění těchto chyb. Výše zmíněné teoretické předpisy pak byly využity ve výsledném modelu, jehož jednotlivé funkční celky byly podrobně popsány a byly rozebrány vstupní parametry jednotlivých funkcí a uživatelské rozhraní skriptu. Práce tak slouží i jako návod k použití výsledného programu.

Skript byl následně otestován na několika prostorově odlišných lokalitách Měsíce. Byl testován na území jižního pólu Měsíce, který je v současnosti diskutován jako možné místo pro vybudování základny. Výsledky navrženého filtračního algoritmu byly testovány na území okolo padesáté severní rovnoběžky. Dále byla intenzita ozařování počítána například v oblasti okolo rovníku. V práci bylo navrženo několik možností vizualizace výsledků, přičemž každý typ je vhodný pro jiný účel.

Základním účelem vytvořeného skriptu je spočítání co nejpřesnější hodnoty intenzity ozařování v několika předem vybraných bodech, protože vhodnost lokace pro vybudování lunární základny ovlivňuje kromě intenzity slunečního záření mnoho dalších faktorů. Proto i za cenu zvýšení procesní náročnosti je počítáno například odražené záření, nebo je počítáno s plošnou reprezentací Slunce. Při iterativním spuštění skriptu je tak možno dosáhnout sumy či průměru intenzity ozařování za určité časové období, což může být právě jeden z rozhodujících údajů pro výběr vhodné lokace k vybudování měsíční základny či místa pro přistání lunárního modulu.

S drobnými úpravami je také možné skript využít i pro výpočty plošných map osvětlení či vizualizaci vzhledu povrchu v konkrétním čase, jak bylo v práci ukázáno. Je nutné však podotknout, že toto nebyl prvotní účel skriptu, a proto není pro podobné činnosti navržený postup optimální.

7. Použitá literatura

ADELMAN, S. J. (2004): *The physical properties of normal A stars*. IAU Symposium No. 224.

Dostupné z URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004IAUS..224....1A>

BLUMTHALER, M., AMBACH, W. (1994): *Changes in solar radiation fluxes after the Pinatubo eruption*. Tellus B, vol. 46, Issue 1, str. 76-78, Innsbruck, únor 1994, Dostupné

z URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1034/j.1600-0889.1994.00007.x/pdf>

ČERVENÁ, L. (2013): *Získávání informace z dat DPZ – Spektrální transformace* [přednáška]. Praha: UK PŘF, 5. března 2013

ČEZ (2014): *Fotovoltaický jev*. Dostupné z URL:

<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/f8.htm>

DEVORKIN, D. H. (1998): *Charles Greeley Abbot 1872 – 1973*. National academy of Science, National Academies Press, Washington D. C., 23 str., Dostupné z URL:

http://www.nasonline.org/publications/biographical-memoirs/memoir-pdfs/abbot_charles.pdf

DOBROVOLNÝ, P. (2009): *Spektrální chování objektů*. Masarykova Univerzita, Dostupné z URL:

http://is.muni.cz/www/680/7404989/prednasky_dpz/DPZ_03_spektralni_chovani.pdf

DUBAYAH, R., RICH, P. M. (1995): *Topographic solar radiation models for GIS*. Int. J. Geographical information systems, vol. 9, No. 4, str. 405 - 419

ESRI (2012a): *ArcGIS help 10.1 – Solar radiation tools*. Dostupné z URL:

http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/Modeling_solar_radiation/009z000000t9000000/

ESRI(2012b): *ArcGIS help 10.1 – What is ArcPy?* Dostupné z URL:

<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/000v000000v7000000>

GOODE, P. R., QIU, J., YURCHYSHYN, V., HICKEY, J., CHU, M. C., KOLBE, E., BROWN, C. T., KOONIN, S. E. (2001): *Earthshine observations of the Earth's reflectance – abstract*.

Geophysical Research Letters, Vol. 28, Issue 9, str. 1671–1674, květen 2001. Dostupné z URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2000GL012580/abstract>

GRASS GIS (2013): *Reference manual – r.sun*. Dostupné z URL:

<http://grass.osgeo.org/grass64/manuals/r.sun.html>

HALOUNOVÁ, L., PAVELKA, K. (2005): *Dálkový průzkum Země*. Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-01-03124-1

HEIKEN, G. H., VANIMAN, D. T., FRENCH, B. M. (1991): *Lunar Sourcebook – A User's Guide to The Moon*. Cambridge University Press 1991, 736 str., ISBN 0-521--33444-6

HOFIERKA, J., ŠŮRI, M. (2002): *The solar radiation model for Open source GIS:*

implementation and applications. Open source GIS – GRASS users conference 2002 – Trento, Italy. Dostupné z URL:

http://skagit.meas.ncsu.edu/~jaroslav/trento/Hofierka_Jaroslav.pdf

- KOLÁŘ, J. (2013): *Získávání informace z dat DPZ – Radiometrické korekce* [přednáška]. Praha: UK PŘF, 31. května 2013
- KOLÁŘ, J. (2011a): *Dálkový průzkum Země – Vlny, Spektrum, Veličiny* [přednáška]. Praha: UK PŘF, 5. října 2011
- KOLÁŘ, J. (2011b): *Dálkový průzkum Země – Interakce elektromagnetického záření s prostředím* [přednáška]. Praha: UK PŘF, 19. října 2011
- LI, X., YU, W., WANG, S., LI, S., TANG, H., LI, Y., ZHENG, Y., TSANG, K. T., OUYANG, Z. (2012): *Condition of Solar Radiation on the Moon*. str 347 – 365 In: BADESCU, V. (2012): *Moon Prospective Energy and Material Resources*. ISBN: 978-3-642-27968-3
- LI, X., WANG, S., ZHENG, Y., CHENG, A. (2008): *Estimation of solar illumination on the Moon: A theoretical model*. Planetary and Space Science 56, str 947 – 950.
- LIEBERT, J., YOUNG, P. A., ARNETT, D., HOLBERG, J. B., WILLIAMS, K. A. (2005): *The Age and Progenitor Mass of Sirius B*. Dostupné z URL: <http://arxiv.org/pdf/astro-ph/0507523v2.pdf>
- LILLESAND, M. T., KEIFER, W. R., CHIPMAN, J. W. (2004): *Remote sensing and image interpretation*. Wiley, 2004, 763 str.
- MALÝ, P. (2008): *Optika*. Univerzita Karlova v Praze. Nakladatelství Karolinum. První vydání. Praha 2008. 361 str. ISBN 978-80-246-1342-0
- MANLEY, R., REYNOLDS, P. (2010): *Climate data information – albedo*. Dostupné z URL: <http://www.climatedata.info/Forcing/Forcing/albedo.html>
- MIKULÁŠEK, Z. (2000): *Úvod do fyziky hvězd a hvězdných soustav*. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity v Brně, Katedra teoretické fyziky a astrofyziky. 310 s. Dostupné z URL: http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/~mira/astrofyzika_pro_fyziky/10_spektroskopie/Uvod_do_FHaHS.pdf
- NASA (2014a): *Earth: Facts and figures*. Dostupné z URL: <http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Earth&Display=Facts>
- NASA (2014b): *Moon Fact Sheet*. Dostupné z URL: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/moonfact.html>
- NASA (2014c): *LOLA RDR Query*. Dostupné z: <http://ode.rsl.wustl.edu/moon/lrololadataPointSearch.aspx>
- NASA (2014d): *Sun: Facts and figures*. Dostupné z URL: <http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Sun&Display=Facts>
- NASA (2014e): *Earth's Moon: Facts and figures*. Dostupné z URL: <http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Display=Facts&Object=Moon>
- NASA (2013): *JPL Horizons*. Dostupné z URL: <http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>
- REICHL, J., VŠETIČKA, M. (2014): *Encyklopedie fyziky*. Dostupné z URL: <http://fyzika.jreichl.com/>

RIRIS, H., CAVANAUGH, J., SUN, X., LIIVA, P., RODRIGUEZ, M., NEUMAN, G. (2010): *The Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) on NASA's Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) mission*. Mezinárodní konference vesmírné optiky, Rhodos, Řecko 2010.

SAARI, J. M., SHORTHILL, R. W. (1972): *The sunlit lunar surface*. The Moon, Volume 5, Issue 1-2, str. 161-178. Dostupné z URL:

<http://articles.adsabs.harvard.edu/full/1972Moon....5..161S/0000161.000.html>

SCHWARZ, R (2012): *Development of an illumination software for the Moon's surface*. Diplomová práce, Univerzita aplikovaných věd v Merseburgu. 196 str.

STERN, A., S. (1999): *The Lunar Atmosphere: History, status, Current problems and context*.

Reviews of Geophysics, Volume 37, Issue 4, str. 453–491. Dostupné z URL:

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.21.9994&rep=rep1&type=pdf>

WONG, L. T., CHOW, W. K. (2001): *Solar radiation model*. The Hong Kong polytechnic University, China. In: Applied Energy 69, str. 191-224. Dostupné z URL:

<http://www.physics.arizona.edu/~cronin/Solar/References/Irradiance%20Models%20and%20Data/WOC01.pdf>

Seznam příloh

Příloha č. 1 – LunarIrradiance.py

Příloha č. 2 – JPLHorizons.py

Příloha č. 3 – CD s elektronickou verzí práce a vytvořeným modelem

Příloha č. 1 – LunarIrradiance.py

```
import math
import time
import datetime
import os
import sys
import shutil
import arcpy
from arcpy.sa import *
arcpy.env.overwriteOutput = True
arcpy.CheckOutExtension('Spatial')
arcpy.CheckOutExtension('3D')

def astrodata(date):
    """This function returns Sun-Moon relative position from input date
    (must be between 1.1.2010 and 1.1.2020) according to JPL Horizons system
    data for lunar surface and it computes solar constant for this specific
    date. Input value is date in format of string 'dd.mm.yyyy hh:mm:ss' and
    output values are solar constant(1), Sun Moon distance(2), Sun Moon
    distance squared (3), longitude of Subsolar point(4) and latitude of
    Subsolar point(5). The source data are stored in *.csv files in folder
    "Data" in the same directory as this script. In case of copying this
    script it has to be copied as well to the same relative position for
    proper functionality of the script!"""

    #formatting input string to year, month, day and hour
    a=date.split(" ")
    hour = a[1].split(":")
    hour = hour[0]
    b = a[0].split(".")
    yr = b[2]
    month = b[1]
    day = b[0]
    cwd=sys.path[0]

    #opening appropriate file from folder
    filename = cwd + "\\data\\" + yr + "-" + month + ".csv"
    f=open(filename,'r')
    for line in f.readlines():
        c = line.split(";")

        #if day and hour match read Solar longitude, latitude and Sun-Moon
        distance
        if c[0] == day:
            if c[1] == hour:
                slon = float(c[2])
                slat = float(c[3])
                smdist = int(c[4])
                break
    f.close()

    #calculating solar constant for input data
    smdist2 = smdist*smdist
    smsurf = 4*math.pi*smdist2
    psun = 3.846e+26
    sconst = psun/smsurf
    return sconst,smdist, smdist2, slon, slat

def projection(infc):
    """This function creates stereographic projection with the coordinate
    origin in the center of input feature class and meters as units in form of
    ArcGIS prj string, which is the first output. Reference body is ArcGIS
    predefined body GCS_Moon. Second output is central meridian."""

    bound = "minbound.shp"
    centr = "centroid.shp"

    #minimum bounding geometry on infc
    arcpy.MinimumBoundingGeometry_management(infc, bound,"CONVEX_HULL","ALL")
```

Příloha č. 1 – LunarIrradiance.py

```
#obtaining centroid of area
arcpy.FeatureToPoint_management(bound, centr)

#finding coordinates of the centroid
desc = arcpy.Describe(centr)
GeomField = desc.shapeFieldName
seaCur = arcpy.SearchCursor(centr)
row = seaCur.next()
geom = row.getValue(GeomField)
pnt = geom.getPart(0)
centr_lon = pnt.X
centr_lat = pnt.Y

del seaCur

#creating unique name of the new coordinate system
name = "Stereographic_moon_" + str(int(centr_lat)) + "_" +
      str(int(centr_lon))
centr_lat=str(centr_lat)
centr_lon=str(centr_lon)

#creating stereographic projection with center on coordinates above
prj = 'PROJCS["' + name + '",
        GEOGCS["GCS_Moon_2000",
        DATUM["D_Moon_2000",
        SPHEROID["Moon_2000_IAU_IAG",1737400.0,0.0]],
        PRIMEM["Reference_Meridian",0.0],
        UNIT["Degree",0.0174532925199433]],
        PROJECTION["Stereographic"],
        PARAMETER["Central_Meridian",' + centr_lon +'],
        PARAMETER["Scale_Factor",1.0],
        PARAMETER["Latitude_Of_Origin",' + centr_lat +'],
        UNIT["Meter",1.0]]'
return prj, centr_lon

def filt(surrfc, infc, outfc, lin, zvalue, pix):
    """This function is a filter, which modifies the input, surrounding,
    output point feature class and line feature class. Firstly it transforms
    the surrounding point layer to raster, then applies a low pass mean filter
    on the raster with size of pix. After that values of the modified raster
    are extracted into surrounding and point layer. All points which are not
    within the range of the zvalue (fifth input in meters) from the raster
    value are deleted! Then output feature class and line layer are compared
    with the point feature class and all respective features are also
    deleted"""

    #creating raster from surrounding feature class
    topotoraster = "topotoraster"
    focalstat = "focalstat"
    arcpy.TopoToRaster_3d(surrfc+" PtTopo PointElevation",topotoraster,"#",
        "#","#","#","NO_ENFORCE","SPOT","#","#","4","0","1","#","#",
        "#","#","#","#","#","#")

    #applying low pass mean filter
    pix_str = str(pix) + " " + str(pix)
    arcpy.gp.FocalStatistics_sa(topotoraster,focalstat,"Rectangle "+pix_str+
        " CELL","MEAN","DATA")

    #extracting values of flattened raster to surrounding feature class
    arcpy.gp.ExtractMultiValuesToPoints_sa(surrfc,focalstat+
        " focal_Stat","NONE")

    #creating selection of all points that are not within specified range
    arcpy.MakeFeatureLayer_management(surrfc, "surrfc_lyr")
    selection = ''' ("focal_Stat" > ("PtTopo"+'''+zvalue+''') AND "focal_Stat"
        > "PtTopo") OR ( "focal_Stat" < ( "PtTopo"-'''+zvalue+''') AND
        "focal_Stat" < "PtTopo") '''
```


Příloha č. 1 – LunarIrradiance.py

```
arcpy.SelectLayerByAttribute_management("surrfc_lyr", "NEW_SELECTION",
    selection)
selectionCount = len(arcpy.Describe('surrfc_lyr').fidset.split(";"))

#if there are any, delete it
if selectionCount != 0:
    arcpy.DeleteFeatures_management("surrfc_lyr")

#extracting values of flattened raster to input point feature class
arcpy.gp.ExtractMultiValuesToPoints_sa(infc, focalstat+
    " focal_Stat", "NONE")
arcpy.MakeFeatureLayer_management(infc, "infc_lyr")
arcpy.MakeFeatureLayer_management(lin, "lin_lyr")
arcpy.MakeFeatureLayer_management(outfc, "outfc_lyr")

#creating selection of all points that are not within specified range
selection = ''' ("focal_Stat" > ("PtTopo"+'''+zvalue+''') AND "focal_Stat"
    > "PtTopo") OR ( "focal_Stat" < ( "PtTopo"-'''+zvalue+''') AND
    "focal_Stat" < "PtTopo") '''
arcpy.SelectLayerByAttribute_management("infc_lyr", "NEW_SELECTION",
    selection)
selectionCount = len(arcpy.Describe('infc_lyr').fidset.split(";"))

#if there are any, select also respective output points and lines and
delete all
if selectionCount != 0:
    arcpy.SelectLayerByLocation_management("lin_lyr", "INTERSECT",
        'infc_lyr', "#", "NEW_SELECTION")
    arcpy.SelectLayerByLocation_management("outfc_lyr", "INTERSECT",
        'infc_lyr', "#", "NEW_SELECTION")
    arcpy.DeleteFeatures_management("infc_lyr")
    arcpy.DeleteFeatures_management("outfc_lyr")
    arcpy.DeleteFeatures_management("lin_lyr")

def reflect(surrfc, infc, azimdeg, dedeg, Al, Gi, log, beginTime, newpath):
    """This function calculates reflected sunlight based on visible and
    sunlit surrounding areas, mean albedo and mean global irradiance. It's
    first input is surrounding point feature class which is recalculated to
    raster DTM. Second input is point layer to which will be added or updated
    attribute table field 'reflect'. This layer can contain more than one
    point, but note that using this algorithm for larger amount of data can be
    very time consuming. Next input is azimuth and height of Sun above the
    horizon both in degrees for calculation of shaded relief. Last are mean
    albedo of surrounding areas and mean global irradiance [W/m2] and tree
    auxiliary processing variables."""

    #labels
    cas = time.clock() - beginTime
    mnt = str(int(cas/60))
    sec = str(int(cas%60))
    arcpy.AddMessage("Elapsed time: {0} minutes {1} seconds".format(mnt, sec))
    arcpy.AddMessage("Begining of reflected irradiance calculation")
    arcpy.AddMessage("Calculating topo to raster")
    record_count = int(arcpy.GetCount_management(infc).getOutput(0))

    #creating raster DTM, binary shadow raster, slope and aspect
    topotoraster = "toporas_refl"
    hillshade = "hillshade"
    hill_recl = "hill_recl"
    slope = "slope"
    aspect = "aspect"

    arcpy.TopoToRaster_3d(surrfc+" PtTopo PointElevation", topotoraster, "#",
        "#", "#", "#", "#", "NO_ENFORCE", "SPOT", "#", "#", "4", "0", "1", "#", "#", "#",
        "#", "#", "#", "#", "#", "#")

    arcpy.AddMessage("Calculating Hillshade")
    arcpy.HillShade_3d(topotoraster, hillshade, azimdeg, dedeg, "SHADOWS", "1")
```

Příloha č. 1 – LunarIrradiance.py

```
arcpy.Reclassify_3d(hillshade,"VALUE","0 30 0;30 255 1",hill_recl,"DATA")

arcpy.AddMessage("Calculating Slope and Aspect")
arcpy.Slope_3d(topotoraster,slope,"DEGREE","1")
outAspect = Aspect(topotoraster)
outAspect.save(aspect)

#adding new data field to infc attribute table if necessary
fieldnames = [f.name for f in arcpy.ListFields(infc)]
if u'reflect' not in fieldnames:
    arcpy.AddField_management(infc, "reflect", "DOUBLE")

#creating cursors for infc
desc = arcpy.Describe(infc)
inGeomField = desc.shapeFieldName
updCur = arcpy.UpdateCursor(infc)

inc=0
#writing info to logfile if desired
if log:
    date=datetime.datetime.now()
    now = str(date.hour) + ":" + str(date.minute) + " " + str(date.day) +
        "." + str(date.month) + "." + str(date.year)
    f=file(newpath + "\\Log.csv","a")
    f.write("Executing reflect at {0}\n".format(now))
    f.write("Number of points is: {0}\n\nCurrent albedo is {1} and Global
        irradiance is {2}\n".format(record_count, Al, Gi))

#progressor and labels
cas = time.clock() - beginTime
mnt = str(int(cas/60))
sec = str(int(cas%60))

arcpy.AddMessage("Elapsed time: {0} minutes {1} seconds".format(mnt, sec))
arcpy.AddMessage("Reflected irradiance calculation")

for row in updCur:
    #obtaining geometry and creating point for viewshed
    geom = row.getValue(inGeomField)
    pnt = geom.getPart(0)
    p=arcpy.Point()
    p.X = pnt.X
    p.Y = pnt.Y
    PG = arcpy.PointGeometry(p)

    #executing viewshed
    viewshed = "in_memory\\viewshed"
    arcpy.Viewsshed_3d(topotoraster,PG,viewshed,"1","FLAT_EARTH",
        "0,13","#")

    #raster sum
    outfcname = "in_memory\\outPlus"
    outPlus = Raster(hill_recl) * Raster(viewshed) * Raster(topotoraster)
    outPlus.save(outfcname)
    arcpy.Delete_management(viewshed)

    #creating numpy array from summary raster
    array = arcpy.RasterToNumPyArray(outfcname)
    arcpy.Delete_management(outfcname)
    S=array.shape
    arr_row = S[0]
    arr_col = S[1]

    #raster upper left corner coordinates and cell width and height
    X=outPlus.extent.XMin
    Y=outPlus.extent.YMax
    dY=outPlus.meanCellHeight
    dX=outPlus.meanCellWidth
```

Příloha č. 1 – LunarIrradiance.py

```
#auxiliary variables
refl = 0.0
pix = 0
Area = dX*dY
loc = str(pnt.X) + " " + str(pnt.Y)
result = (arcpy.GetCellValue_management(slope, loc))
result = result.getOutput(0)
result = result.replace(",",".")
pntslope = float(result)
sigma = math.radians(pntslope)

result = (arcpy.GetCellValue_management(aspect, loc))
result = result.getOutput(0)
result = result.replace(",",".")
pntasp = float(result)
omega = math.radians(pntasp)

#normal vector calculation
n=[math.sin(omega)*math.tan(sigma), math.cos(omega)*math.tan(sigma),1]
ln = math.sqrt(n[0]*n[0] + n[1]*n[1] + n[2]*n[2])

#going through the array pixel by pixel
for i in range (arr_row):
    for j in range (arr_col):
        rasz = array[i][j]

        #if illuminated and visible calculate squared distance
        if rasz != 0 and rasz > -15000 and rasz < 15000:

            #obtaining pixel coordinates
            rasx=X+(j*dX)+(dX/2)
            rasy=Y-(i*dY)-(dY/2)

            #calculating vector v components by subtracting mutual
            coordinates
            x = (rasx-pnt.X)
            y = (rasy-pnt.Y)
            z = (rasz-pnt.Z)
            d2 = (x*x + y*y + z*z)

            #if distance is smaller than pixel size, skip this point
            (the same pixel as the point)
            if d2 < Area/2:
                continue

            #vector v and its length
            v=[x,y,z]
            lv=math.sqrt(d2)

            #calculation of reflected irradiation and incidence angle
            r = (A1*Gi*Area)/(2*math.pi*d2)
            cosbeta = (n[0]*v[0] + n[1]*v[1] + n[2]*v[2])/(lv+ln)

            #if mutual angle is negative, reflected irradiance is zero
            if cosbeta < 0:
                continue

            #incidence angle correction of reflected irradiance and
            adding value tu sum
            r = cosbeta * r
            refl += r
            pix+=1

#writing final sum of reflected irradiance for current point
row.setValue(u'reflect',refl)
updCur.updateRow(row)
inc +=1
```

Příloha č. 1 – LunarIrradiance.py

```
#releasing locks and closing log file
del updCur
f.close()

def visible_point(infc, surrfc, outfc, date, filter_value, reflect_value,
zvalue, pix, temp, log):
    """This function calculates intensity of solar radiation on the lunar
    surface. It is designed as a source code for ArcGIS script. Script is
    designed for Lunar Reconnaissance Orbiter LOLA point shapefile data for
    input and surrounding feature class. This data are freely available.
    Output feature class is shapefile only. In the same folder as destination
    of output shapefile is created temporary directory, into which all
    auxiliary files required for the calculation are saved. This folder is or
    is not deleted in dependence to users choice after finishing the
    computation. The choice is represented by input boolean value "temp".
    Boolean input "filter_value" is a representation of users choice, whether
    filtration, as described above, should be performed with "zvalue" as
    a critical value and "pix" as a grid size. Similarly on boolean
    "reflect_value" depend computation of reflected irradiance as described
    above. Input "date" is used to obtain Sun-Moon position data by function
    astrodata described above. Boolean value "temp" indicates if is desired
    to store temporary data. If boolean value "log" is true, a log file in
    form of log.csv file is created in the temporary folder."""

    adres2=outfc.rpartition("\\")
    outfcname=adres2[2]

    #progressor settings
    beginTime = time.clock()
    arcpy.SetProgressorLabel("Creating temporary data")
    record_count = int(arcpy.GetCount_management(infc).getOutput(0))
    surr_count = int(arcpy.GetCount_management(surrfc).getOutput(0))
    arcpy.AddMessage("Number of records in infc: " + str(record_count))
    increment = int(record_count/100)
    if increment == 0:
        increment = 1

    #creating temporary data storage
    at=datetime.datetime.now()
    tm = str(at.day) + str(at.month)+str(at.year)+"_"+str(at.hour)
        +str(at.minute)
    newpath = adres2[0] + '\\temp_' + tm
    while os.path.exists(newpath):
        newpath = newpath + "1"
    os.makedirs(newpath)

    #defining workspace
    arcpy.env.workspace = newpath
    arcpy.AddMessage("Arcpy working environment: " + arcpy.env.workspace)

    #defining initial projection
    prj = '''GEOGCS["GCS_Moon_2000",DATUM["D_Moon_2000",
        SPHEROID["Moon_2000_IAU_IAG",1737400.0,0.0]],
        PRIMEM["Reference_Meridian",0.0],
        UNIT["Degree",0.0174532925199433]]'''

    #if log, write current time, and input parameters to logfile
    if log == "true":
        log=True
        f=file(newpath + "\\Log.csv","a")
        f.write("Executing script Illumination at {0}\n\n".format(time))
        f.write("Input feature class: {0}, Surrounding featureclass {1},
            output featureclass: {2}, Date: {3}, Reflect_value is {5},
            Filter_value is {4}, z_value is {6} and temp is {7}.\n\n"
            .format(infc, surrfc, outfc, date, filter_value, reflect_value,
            zvalue, temp, log))
```

Příloha č. 1 – LunarIrradiance.py

```
f.write("Number of points in input featureclass is: {0}\n"
       .format(record_count))
f.write("Number of points in surrounding featureclass is: {0}\n"
       .format(surr_count))
else:
    log=False

#creating output featureclass
if arcpy.Exists(outfc):
    arcpy.Delete_management(outfc)

arcpy.CreateFeatureclass_management(arcpy.env.workspace, outfcname,
    "POINT", "#", "DISABLED", "ENABLED", prj)
arcpy.AddField_management(outfcname, "Delta", "DOUBLE")
arcpy.AddField_management(outfcname, "LEST", "DOUBLE")
arcpy.DeleteField_management(outfcname, "Id")

#creating line featureclass
lin = "line.shp"
arcpy.CreateFeatureclass_management(arcpy.env.workspace, lin, "POLYLINE",
    "#", "DISABLED", "ENABLED", prj)
arcpy.AddField_management(lin, "i", "DOUBLE")

arcpy.AddMessage("Obtaining position of the Sun for input date")

#obtaining Sun-Moon position data from astrodata function
a = astrodata(date)
sconst,smdist, smdist2, slon, slat = a[0], a[1], a[2], a[3], a[4]

#defining new projection
prj,centr_lon = projection(infc)

#subsolar point longitude correction
if slon > (float(centr_lon) + 180):
    slon = slon - 360

arcpy.AddMessage("Subsolar latitude: {0}, Subsolar longitude{1}"
    .format(slat, slon))

#recalculating to radians
rslat = math.radians(slat)
rslon = math.radians(slon)

#defining moon radius and line distance
rmoon = 1737100
vzd = 180000

#obtaining shape field names
desc = arcpy.Describe(infc)
inGeomField = desc.shapeFieldName

desc = arcpy.Describe(lin)
outGeomField = desc.shapeFieldName

desc2 = arcpy.Describe(outfcname)
outGeomField2 = desc2.shapeFieldName

#creating cursors
seaCur = arcpy.SearchCursor(infc)
insCur = arcpy.InsertCursor(lin)
insCurr = arcpy.InsertCursor(outfcname)
inc = 0

#progressor and labels
cas = time.clock() - beginTime
mnt = str(int(cas/60))
sec = str(int(cas%60))
arcpy.AddMessage("Elapsed time: {0} minutes {1} seconds".format(mnt, sec))
```

Příloha č. 1 – LunarIrradiance.py

```
arcpy.AddMessage("Illumination lines calculation")
arcpy.SetProgressor("step", "Illumination lines calculation", 0,
    record_count, increment)
meandedeg, meanazimdeg, meanAl, meanGi = 0.0, 0.0, 0.0, 0.0

#for every point in input feature
for row in seaCur:
    #reading geometry and attributes
    geom = row.getValue(inGeomField)
    pnt = geom.getPart(0)
    topo = row.getValue(u'PtTopo')
    ptlat = row.getValue(u'PtLat')
    ptlon = row.getValue(u'PtLon')
    rptlat = math.radians(ptlat)
    rptlon = math.radians(ptlon)

    #declination calculation
    alpha = math.acos(math.sin(rptlat)*math.sin(rslat)
        + math.cos(rptlat)*math.cos(rslat)*math.cos(rptlon - rslon))
    beta = math.asin((rmoon*math.sin(alpha))/(math.pow((smdist2
        + rmoon*rmoon - 2*smdist*rmoon*math.cos(alpha)),0.5)))
    i = alpha + beta
    delta = math.pi/2 - i

    #writing geometry
    newRow = insCur.newRow()
    bod = arcpy.Point(pnt.X, pnt.Y, topo)
    bod2 = arcpy.Point(slon, slat, 0)
    geom = arcpy.Array()
    geom.add(bod)
    geom.add(bod2)
    newRow.setValue("i", i)
    newRow.setValue(outGeomField, geom)
    insCur.insertRow(newRow)
    del newRow

    #adding points to the new layer
    newRow2 = insCurr.newRow()
    bod1 = arcpy.Point(pnt.X, pnt.Y, topo)
    newRow2.setValue(outGeomField2, bod1)
    newRow2.setValue(u'Delta', delta)
    insCurr.insertRow(newRow2)
    del newRow2

    #calculation of albedo and global irradiance
    if reflect_value == "true":
        Gi = sconst * math.sin(delta)
        meanGi += Gi
        energy = float(row.getValue(u'PtEnergy'))
        albedo = (energy/2.7)*0.58
        meanAl +=albedo
    inc+=1
    if (inc % increment) == 0:
        arcpy.SetProgressorLabel("Calculated {0} lines from
            {1}".format(inc, record_count))
        arcpy.SetProgressorPosition(inc)

del seaCur, insCur, insCurr

dedeg = math.degrees(delta)

#projecting line featureclass to new projection
arcpy.AddMessage("Projecting line feature class")
arcpy.Project_management(lin, "line_prj", prj)
lin = "line_prj.shp"
```

```
#projecting output featureclass to new projection
arcpy.AddMessage("Projecting output feature class")
arcpy.Project_management(outfcname, outfc, prj)

#projecting input featureclass to new projection
arcpy.AddMessage("Projecting input feature class")
arcpy.Project_management(infc, "infc", prj)
infc = "infc.shp"

#projecting surrounding featureclass to new projection
arcpy.AddMessage("Projecting surrounding featureclass")
arcpy.Project_management(surrfc, "surroundfeature", prj)
surrfc = "surroundfeature.shp"

#filtering input featureclass
arcpy.AddMessage("Number of records in surrounding featureclass: "
+ str(surr_count))
if filter_value == "true":
    if surr_count < 50:
        arcpy.AddMessage("Insufficient number of surrounding points for
filtration, the filtration is skipped.")
    else:
        arcpy.SetProgressorLabel("Filtering surrounding feature class")
        arcpy.AddMessage("Filtering surrounding feature class")
        filt(surrfc, infc, outfc, lin, zvalue, pix)
        d_surr, d_infc = surr_count, record_count
        surr_count = int(arcpy.GetCount_management(surrfc).getOutput(0))
        record_count = int(arcpy.GetCount_management(infc).getOutput(0))
        d_surr -= surr_count
        d_infc -= record_count
        arcpy.AddMessage("In filtration was deleted {0} points from
surrounding featureclass and {1} points from input
featureclass.".format(d_surr,d_infc))

#if all input points were deleted skip whole script by raising
error
if record_count == 0:
    arcpy.AddMessage("All input points were deleted during
filtration. Disable filtration or change z-value.
Illumination is stopped.")
    arcpy.Delete_management(outfc)
    raise NameError("All input points deleted during filtration!
Disable filtration, select different input points or
change z-value!")
else:
    arcpy.AddMessage("Number of points in input featureclass after
filtration is {0}.".format(record_count))

#creating line feature class, which will have corrected declination
lincor = "lincorr.shp"
arcpy.CreateFeatureclass_management(arcpy.env.workspace, lincor,
"POLYLINE", "#", "DISABLED", "ENABLED", prj)

#creating cursors
desc = arcpy.Describe(lin)
GeomField = desc.shapeFieldName
seaCur = arcpy.SearchCursor(lin)

desc = arcpy.Describe(lincor)
inGeomField = desc.shapeFieldName
insCur = arcpy.InsertCursor(lincor)
pid = 0

#for each line in "line.shp"
for row in seaCur:
    pid+=1
```

Příloha č. 1 – LunarIrradiance.py

```
#obtain coordinates of both points
geom = row.getValue(GeomField)
pnt = geom.getPart(0)
x1, y1, z1, x2, y2 = pnt[0].X, pnt[0].Y, pnt[0].Z, pnt[1].X, pnt[1].Y
i = row.getValue('i')
#moon curvature correction
angle = math.atan(math.sqrt(x1*x1 + y1*y1)/rmoon)
cosan = math.cos(angle)
topocorr = (rmoon*(1 - cosan))/(cosan)
topo = z1 - topocorr

#calculating azimuth
azim=math.atan((x2-x1)/(y2-y1))

#azimuth correction
if (y2-y1)<0:
    azim +=math.pi

#sun disc apparent size calculation
r = math.radians((32.0/60.0)*0.5)
r2 = r * math.sqrt(2)/2

#partition of solar disc to 8 areas represented by line on edge of the
area
vect = [[i-r,azim],[i-r2,azim + r2], [i,azim + r], [i+r2, azim+r2],
        [i+r,azim], [i+r2, azim-r2],[i, azim-r],[i-r2, azim-r2]]
for d in range(len(vect)):

    #creating lines with corrected coordinates
    i,azim = vect[d][0],vect[d][1]
    vx = abs(math.sin(i))*math.sin(azim)
    vy = abs(math.sin(i))*math.cos(azim)
    vz = math.cos(i)
    vzd = 180000

    #creating an input row for the line layer
    bx = x1 + vx*vzd
    by = y1 + vy*vzd
    bz = z1 + vz*vzd
    newRow = insCur.newRow()
    bod = arcpy.Point(x1, y1, topo+1)
    bod2 = arcpy.Point(bx, by, bz)
    geom = arcpy.Array()
    geom.add(bod)
    geom.add(bod2)
    newRow.setValue(outGeomField, geom)
    insCur.insertRow(newRow)

del insCur, seaCur

#azimuth of last line as an input to hillshade function
azimdeg=math.degrees(azim)
if azimdeg <0:
    azimdeg+=360

#progressor definition
surr_increment = int(surr_count/100)
if surr_increment == 0:
    surr_increment = 1
arcpy.AddMessage("Surrounding feature class recalculation")
arcpy.SetProgressor("step","Surrounding feature class recalculation",0,
    surr_count, surr_increment)
inc=0

#surrounding feature class recalculation
desc = arcpy.Describe(surrfc)
upGeomField = desc.shapeFieldName
upCur = arcpy.UpdateCursor(surrfc)
```


Příloha č. 1 – LunarIrradiance.py

```
for row in upCur:
    if (inc % surr_increment) == 0:
        arcpy.SetProgressorLabel("Surrounding featureclass: Calculated {0}
            points from {1}".format(inc, surr_count))
        arcpy.SetProgressorPosition(inc)
        geom = row.getValue(upGeomField)
        pnt = geom.getPart(0)
        topo = row.getValue(u'PtTopo')

        #moon curvature correction
        angle = math.atan(math.sqrt(pnt.X*pnt.X + pnt.Y*pnt.Y)/rmoon)
        cosan = math.cos(angle)
        topocorr = (rmoon*(1 - cosan))/(cosan)
        topo = topo - topocorr
        row.setValue(u'PtTopo',topo)
        upCur.updateRow(row)
        inc+=1
del upCur

#progressor and labels
arcpy.SetProgressor("default", "Creating TIN")
arcpy.AddMessage("Creating TIN")

#minimum bounding area
hull="hull.shp"
arcpy.MinimumBoundingGeometry_management(lin, hull,"CONVEX_HULL", "ALL")

#select from surrounding
arcpy.MakeFeatureLayer_management(surrfc, "surr_lyr")
arcpy.SelectLayerByLocation_management('surr_lyr', 'WITHIN_A_DISTANCE',
    hull, 2000)

#creating TIN from selected points
tin = "tinn"
arcpy.CreateTin_3d(tin, prj, "surr_lyr" + " PtTopo masspoints")

#progressor actualization
cas = time.clock() - beginTime
mnt = str(int(cas/60))
sec = str(int(cas%60))
arcpy.AddMessage("TIN created at: {0} min {1} sec".format(mnt, sec))
arcpy.AddMessage("Intersecting")
arcpy.SetProgressorLabel("Intersecting")

#creating auxiliary layers
los = "los.shp"
one = "one_row.shp"

#intersection
arcpy.Intersect3DLineWithSurface_3d(lincor, tin, los)
arcpy.Select_analysis(los, one, "" "SURF_FROM" = ' ' """)

#progressor actualization
cas = time.clock() - beginTime
mnt = str(int(cas/60))
sec = str(int(cas%60))
arcpy.AddMessage("Intersection finished at: {0} minutes {1}
    seconds".format(mnt, sec))
arcpy.AddMessage("Azim: {0}, Dedeg: {1}".format(azimdeg, dedeg))

#calculation of reflected sunlight
if reflect_value == "true":

    #if sun is under horizon, reflected calculation is skipped
    if dedeg < 0:
        arcpy.AddMessage("Sun is under horizon. Calculation of reflected
            sunlight is skipped.")
```

```

else:
    #calculating means of azimuth, delta, albedo and global irradiance
    meanAl = meanAl/record_count
    meanGi = meanGi/record_count
    arcpy.AddMessage("Albedo: {0}, Global: {1}".format(meanAl,
        meanGi))
    #reflected irradiance calculation
    reflect(surrfc, outfc, azimdeg, dedeg, meanAl, meanGi, log,
        beginTime, newpath)

    cas = time.clock() - beginTime
    mnt = str(int(cas/60))
    sec = str(int(cas%60))
    arcpy.AddMessage("Reflected irradiation calculated at: {0} minutes
        {1} seconds".format(mnt, sec))

arcpy.AddMessage("Updating")

#creating cursor
seaCur = arcpy.SearchCursor(one)
desc = arcpy.Describe(one)
seaGeomField = desc.shapeFieldName
updCur = arcpy.UpdateCursor(outfc)

inc=0
lin_count = int(arcpy.GetCount_management(one).getOutput(0))

#updating output layer
arcpy.SetProgressor("step", "Point updating: ", 0, lin_count)
first = True
result = 0.0

#for all lines in lin_cor
for row in seaCur:

    #get coordinates of first point
    geom = row.getValue(seaGeomField)
    pnt = geom.getPart(0)
    xnew, ynew = pnt[0].X, pnt[0].Y
    if first:
        #if first line old coordiantes are the same
        first=False
        xold,yold = xnew,ynew

    #if coordinates are equal, all lines representing sun disc areas
    #belong to the same point
    if xold == xnew and yold==ynew:
        #if line dont intersect with surface, count with this sun disc
        #area
        inter = row.getValue("SURF_TO")
        if inter == " ":
            result += 1.0/8.0
            xold,yold = xnew,ynew

    #if coordinates are different
    else:
        #calculate irradiance respective to visible sun disc area and
        #write it to attribute LESI
        row2=updCur.next()
        delta = row2.getValue(u'Delta')
        light = result * sconst * math.sin(delta)

```

```
#if delta is negative and some lines do not intersect with
#surface, point is under surface and shouldn't be taken in to
#computation or point is higher than surrounding terrain and can
#be illuminated even with negative delta, in both cases further
#manual inspection is needed!
if light < 0:
    row2.setValue("LESI", -0.1)

#if not, irradiance is positive
else:
    row2.setValue("LESI", light)
updCur.updateRow(row2)
#reset area fraction
result = 0.0
inter = row.getValue("SURF_TO")

#if line do not intersect with surface, count with this sun disc
area
if inter == " ":
    result += 1.0/8.0
xold,yold = xnew,ynew

inc+=1

#progressors and labels
arcpy.SetProgressorLabel("Calculated {0} lines from {1}".format(inc,
lin_count))
arcpy.SetProgressorPosition(inc)

#last point writing
row2=updCur.next()
delta = row2.getValue(u'Delta')
light = result * sconst * math.sin(delta)
if light < 0:
    row2.setValue("LESI", 0.1)
else:
    row2.setValue("LESI", light)
updCur.updateRow(row2)

#deleting cursors (releasing locks)
del seaCur, updCur

#if choice "store temporary files" is not checked, delete temp folder
if temp=="false":
    shutil.rmtree(newpath)
arcpy.ResetProgressor()

#input parameters from arcpy script
infc = arcpy.GetParameterAsText(0)
surrfc = arcpy.GetParameterAsText(1)
outfc = arcpy.GetParameterAsText(2)
date = arcpy.GetParameterAsText(3)
reflect_value = arcpy.GetParameterAsText(4)
filter_value = arcpy.GetParameterAsText(5)
zvalue = arcpy.GetParameterAsText(6)
pix = arcpy.GetParameterAsText(7)
temp = arcpy.GetParameterAsText(8)
log = arcpy.GetParameterAsText(9)

#calling the function
visible_point(infc, surrfc, outfc, date, filter_value, reflect_value, zvalue,
pix, temp, log)
```

Příloha č. 2 – JPLSplit.py

```
import os
def jplsplit(path):
    """This function split input JPL Horizons text data
    and converts it to *.csv files for each month. These
    are saved to the same folder as this script."""

    #auxiliary variables
    f = open(path, 'r')
    read = False
    first = True
    au = 149597870.691
    t = {"Jan": "1", "Feb": "2", "Mar": "3", "Apr": "4", "May": "5", "Jun": "6",
        "Jul": "7", "Aug": "8", "Sep": "9", "Oct": "10", "Nov": "11", "Dec": "12"}

    #for each row in input file
    for row in f.readlines():
        #when data start begin reading
        if row == "$$SOE\n":
            read = True
            continue
        #when data stop finish
        if row == "$$EOE\n":
            break
        if read:
            #splitting row
            a=row.split(' ')
            b=[]

            #deleting whitespaces
            for i in range(len(a)):
                if a[i] != "":
                    b.append(a[i])

            #splitting date
            c=b[0].split("-")
            yr=c[0]
            mon = t[c[1]]
            day = str(int(c[2]))
            hour = str(int(b[1][0]+b[1][1]))
            dist = str(long(float(b[4])*au*1000))+ "\n"
            d=[day, hour, b[2], b[3], dist]
            name=yr+"-"+mon+".csv"

            #for first row open new file
            if first:
                first = False
                dat = open(name, 'a')
                nameold = name

            #for new month change files
            if name != nameold:
                dat.close()
                dat = open(name, 'a')
                nameold=name

            #saving records
            dat.write(";".join(d))
    f.close()

#path from keyboard input
ins = raw_input("Insert path to horizons text file: ")
if os.path.exists(ins):
    jplsplit(ins)
    print "Successfully completed. Press any key to exit."
    x=raw_input()
else:
    print "Invalid path. Press any key to exit."
    x=raw_input()
```