

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

Институт за космически изследвания и технологии

Секция „Дистанционни изследвания и ГИС“

Маг. Искрен Славев Иванов

**КАРТОГРАФИРАНЕ НА ТЕЖКИ МЕТАЛИ И
МИНЕРАЛИ ПО СПЪТНИКОВИ
СПЕКТРОМЕТРИЧНИ ДАННИ В УДАРЕН ЛУНЕН
КРАТЕР В БАСЕЙНА АПОЛО**

АВТОРЕФЕРАТ

**на дисертационен труд
за присъждане на образователна и научна степен**

„Доктор“

Област на висше образование:

4. „Природни науки, математика и информатика“

Професионално направление:

4.4. „Науки за Земята“

Научна специалност:

„Дистанционни изследвания на Земята и планетите“

Научен ръководител:

Проф. д-р Лъчезар Филчев

София, 2025 г.

Дисертацията е обсъдена и допусната до защита на разширено заседание на секция „Дистанционни изследвания и ГИС“ на ИКИТ-БАН, състояло се на 17.09.2025 г. с Протокол №9.

Дисертационният труд включва 187 страници, 5 таблици, 26 фигури и 219 литературни източника от които 2 на кирилица и 215 на латиница.

Защитата на дисертацията ще се състои на 26.11.2025 г. в зала 309 на блок 1 на ИКИТ-БАН на открито заседание на научно жури в състав:

1. Проф. д-р инж. Георги Желев – ИКИТ-БАН
2. Проф. д.т.н. инж. Гаро Мардиросян – ИКИТ-БАН
3. Чл.-кор. проф. д.г.н. Кристилина Христова Стойкова – ГИ-БАН
4. Проф. д-р Георги Железов – НИГТГ-БАН
5. Проф. д-р Никола Колев – РУ „Ангел Кънчев“

Дисертационният труд има следната структура:

СЪДЪРЖАНИЕ

СПИСЪК НА ИЗПОЛЗВАНИТЕ СЪКРАЩЕНИЯ И СИМВОЛИ

I. УВОД

II. МАТЕРИАЛИ И МЕТОДИ

III. РЕЗУЛТАТИ

IV. ИЗВОДИ, ЗАКЛЮЧЕНИЯ И ПРИНОСИ

V. ПРИЛОЖЕНИЯ

VI. БЛАГОДАРНОСТИ

ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

СЪДЪРЖАНИЕ

Списък на използваните съкращения и символи	4
I. УВОД.....	7
1.1 Актуалност и значимост на темата	7
1.6 Цел и задачи на дисертацията	13
II. МАТЕРИАЛИ И МЕТОДИ	15
2.1 Материали	15
2.2 Методи	15
2.3 Първична обработка на данните.....	18
III. РЕЗУЛТАТИ	20
3.1 Морфоложко описание на ударния кратер Драйдън.....	20
3.2 Картографиране на пространственото разпределение на анортозит и минерали в кратера Драйдън	24
3.3 Картографиране на пространственото разпределение и концентрация на тежки метали в кратера Драйдън.....	31
3.4 Геолого-минераложка интерпретация на кратера Драйдън	38
IV. ИЗВОДИ, ЗАКЛЮЧЕНИЯ И ПРИНОСИ.....	41
4.1 Обобщени научни изводи.....	41
4.2 Закljučения.....	43
4.3 Научни и научно-приложни приноси.....	44
4.4 Публикации	44
V. ПРИЛОЖЕНИЯ.....	46
5.3 Приложения към глава 3 РЕЗУЛТАТИ.....	46
VI. БЛАГОДАРНОСТИ	56
ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА	59

Списък на използваните съкращения и символи

На български език:

На английски език:

БАН – Българската академия на науките	ACT – Applied Coherent Technology Corporation
ЕКА – Европейска космическа агенция	Al – алуминий
ЕС – Европейски съюз	AMIE – Advanced-Moon micro-Imager Experiment
ИКИТ – Институт за космически изследвания и технологии	An – индекс за анодозит
ЛКС – Лунна координатна система	ASCII – American Standard Code for Information Interchange
МАЕ - Международна агенция по енергетика	Ca – калций
МАС – Международен астрономически съюз	csp – централен връх на кратера
Мас. % – масов процент	cfd – депресия в дъното на кратера
НАСА - Националната администрация по въздухоплаване и изследване на космическото пространство	CLEP – China’s Lunar Exploration Program
ООН - Организация на обединените нации	CNSA – China National Space Administration
ПРС – пространствена разделителна способност	cr – върхове в кратера
СОХ – спектралните отразителни характеристики	CP - индекс за хромит
СПС – спектрална разделителна способност	CPX – клинопироксен
	Cr – хром
	DEM – Digital Elevation Model/цифров модел на релефа
	DSEL – Deep Space Exploration Laboratory
	ENVI – Environment for Visualizing Images
	ESA – European Space Agency

ESRIC – European Space Resource Innovation Centre	ISRO – Indian Space Research Organisation
FCC – False Color Composite	ISRU – In Situ Resource Utilization (добив и използване на местни ресурси)
Fe – желязо	JAXA – Japan Aerospace Exploration Agency
Fe^{2+} – двувалентен желязен катион	JPL – Jet Propulsion Laboratory/Лаборатория за реактивно движение
FeO – желязен оксид	km – километър
Ga – giga-annum, единица за време, равна на 1 милиард години	LBMC – Lunar-Based Manufacturing and Construction
GCS – Geographic Coordinate System	LCP – нискокалциев пироксен
GIS – Geographic Information System/ географска информационна система	LISM – Lunar Imager/Spectrometer
GMAP – Geologic Mapping of Planetary bodies	LOLA – Lunar Orbiter Laser Altimeter
GPa – гигапаскал	LRO – Lunar Reconnaissance Orbiter
GRAIL – Gravity Recovery and Interior Laboratory	LROC – Lunar Reconnaissance Orbiter Camera
GSFC – Goddard Space Flight Center	LSII – Lunar Surface Innovation Initiative
hcf – хълмисто дъно на кратера	LUPEX – Lunar Polar Exploration Mission
ht – хълмист терен	m – метър
IAU – International Astronomical Union	M^3 – Moon Mineralogy Mapper
IEA – International Energy Agency	ME – Mean Earth/Polar axis/Усреднена Земя/Полярна ос
IGM – Input Geometry	Mg – магнезий
in situ – на място	
IP – индекс за желязо	
is – вътрешен склон	

MWIR – Mid-Wave Infrared	SLDEM2015 - Цифровият модел на релефа на лунната повърхност
NASA – National Aeronautics and Space Administration	SMART-1 – Small Missions for Advanced Research in Technology
Nm – нанометри	SP – Spectral Profiler
npFe ⁰ - наноразмерно желязо	Sp - индекс за шпинел
OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development	SPA – South Pole–Aitken basin
OPX – ортопироксен	ss – стръмни склонове
PAN – pure anorthosite/ чист анортозит	st – тераси от свлачищен тип
PDS – Planetary Data System	SWIR – Short-Wave Infrared
Px –индекс за пироксен	TC – Terrain Camera
QGIS – Quantum GIS (Geographic Information System)	Ti – титан
RELAB – Reflectance Experiment Laboratory	TiO ₂ – титанов диоксид
RGB – Red, Green, Blue (цветови модел)	TP - индекс за титан
RI – Research Infrastructure	USGS – United States Geological Survey
ROI – Region of Interest	UV – Ultraviolet
SAGA – System for Automated Geoscientific Analyses	UV–Vis – Ултравиолетово-видими
sc – малки кратери	Vis – Visible
SELENE – SELenological and Engineering Explorer (Kaguya)	VNIR – Visible and Near-Infrared
Si – силиций	WAC – Wide Angle Camera
	λ – дължина на електромагнитната вълна (nm)
	° – градус, мерна единица за ъгъл

I. УВОД

1.1 Актуалност и значимост на темата

Глобални демографски фактори за нарастващото търсене на минерални суровини

През последните десетилетия глобалното демографско и икономическо развитие доведе до устойчиво нарастване на търсенето на природни ресурси, включително стратегически минерали и метали, ключови за индустриалното и технологично развитие. Според доклада *World Population Prospects 2024* на Отдела по икономически и социални въпроси на Организацията на обединените нации (ООН) (United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2024) се прогнозира значителен ръст на световното население, което ще окаже допълнителен натиск върху ресурсните системи.

Критични и стратегически суровини: глобални предизвикателства и регулаторен отговор

Паралелно с тези демографски тенденции, глобалният преход към нисковъглеродна икономика ускорява ръста в търсенето на критични минерали и метали. Според стратегическия доклад *Global Critical Minerals Outlook 2024* на Международната агенция по енергетика (МАЕ) (IEA, 2024), през 2023 г. е отчетено увеличение между 8% и 30% в търсенето на различни критични елементи. Основни двигатели на тази тенденция са урбанизацията, разширяването на средната класа, технологичния напредък и засилените политики за устойчиво развитие (Christmann et al., 2022). Особено значимо е влиянието на енергийната трансформация, при която новите нисковъглеродни технологии изискват значително по-голямо количество и разнообразие от суровини. Прогнозите на МАЕ очертават сериозен дисбаланс между търсенето и предлагането на критични ресурси до 2035 г., с потенциален дефицит между 30% и 50%.

Стратегическа трансформация

Нарастващият антропогенен натиск върху природните ресурси на Земята, обусловен от глобалните демографски, индустриални и технологични тенденции, налага стратегическо преосмисляне на парадигмата за осигуряване на ресурси. В този контекст се засилва необходимостта от проактивно, визионерско и дългосрочно ориентирано търсене на нови източници на суровини, включително такива с произход извън пределите на нашата планета. Научната,

индустриалната и политическата общност обръщат засилено внимание на Луната, която заема особено място, благодарение на своята близост до Земята (Crawford, 2015; ESA 2019; NASA, 2020; ESA 2024).

Съвременният технологичен напредък в космическите изследвания, роботиката, материалознанието и 3D принтирането трансформират Луната от обект на фундаментално научно изследване в практическа цел за добив и използване на местни ресурси (In Situ Resource Utilization – ISRU) за изграждане на постоянна инфраструктура на лунната повърхност (Crawford, 2015; European Space Agency, n.d.; Lindbergh, 2024).

Потенциалът за използване на лунни ресурси, включително редкоземни елементи, метали от платиновата група и хелий-3 е в основата на интензивна международна надпревара за стратегическо предимство в рамките на зараждащата се космическа икономика (Lindbergh, 2024; OECD, 2022). В този контекст лунният реголит е от особено значение като обект на изследване и потенциален източник на кислород (O), желязо (Fe), титан (Ti), хром (Cr), алуминий (Al), силиций (Si), магнезий (Mg) и редкоземни елементи (Papike et al., 1982).

Реголитът е резултат от сложни физикогеоложки и космически процеси – механично раздробяване, шоково претопяване, аглутинация и космическо изветряне. Неговият състав и дебелина варират значително в различните региони на Луната, предоставяйки косвена информация за скалния състав на кората и структурите в дълбочина (Cudnik, 2023). Изследванията на лунния реголит чрез дистанционни методи имат ключова роля за идентифициране на минерални фази, картографиране на повърхностните особености и формиране на база за бъдещи *in situ* (на място) мисии.

Луната като платформа за индустриално и научно развитие

Луната се смята за възможен източник на ресурси с висок потенциал за бъдещо индустриално използване, което я превръща в стратегически обект на интерес за редица национални и международни космически инициативи. Нейното значение се подчертава от програма Artemis (Артемидида) (Smith et al., 2020) на NASA (National Aeronautics and Space Administration), чрез която САЩ и международните им партньори заявяват намерение за изграждане на устойчива инфраструктура на лунната повърхност под формата на базов лагер Artemis Base Camp, разположен в района на лунния южен полюс (Chavers et al., 2019; NASA, 2020).

Паралелно с това, в отговор на необходимостта от интегрирано и координирано европейско участие в изследванията на космоса и Слънчевата система се реализира проектът Europlanet 2024 Research Infrastructure (RI). Тази водеща изследователска платформа укрепва позицията на Европа в областта на планетарната наука и създава условия за междудисциплинарно сътрудничество (Europlanet Society, 2023; European Commission, 2019). В рамките на инициативата Geologic Mapping of Planetary Bodies (GMAP) се развиват инструменти за дистанционно геоложко картографиране и изследване на планетарни повърхности, включително Луната. В този контекст, научни изследвания, фокусирани върху картографиране на минерали и тежки метали в сложни ударни кратери, като Драйдън, чрез анализ на дистанционно регистрирани спектрални и топографски данни, отговарят както на дългосрочната научна визия на Европейския съюз, изразена чрез финансирането на Europlanet 2024 RI (European Commission, 2019), така и на стратегическите приоритети на Европейската космическа агенция (ЕКА) (European Space Agency, 2019).

Изследване на Луната извършва също и Китайската национална космическа администрация (CNSA), която провежда дългосрочната Китайска програма за проучване на Луната (China's Lunar Exploration Program, CLEP), в рамките на която са осъществени успешни мисии Chang'e 1 до Chang'e 6, включващи орбитъри, спускаеми апарати, луноходи и мисии за вземане на проби (Li et al., 2019; Wei et al., 2021). Индийската организация за космически изследвания (ISRO) също допринася чрез своята програма Chandrayaan (Sundararajan, 2012), а съвместната японско-индийска мисия Lunar Polar Exploration Mission (LUPEX), подготвяна от Японската агенция за аерокосмически изследвания (JAXA) и ISRO, има за цел да извърши детайлно проучване на водния лед в района на южния полюс (Hoshino et al., 2020).

Интересът към In Situ Resource Utilization (ISRU) се засилва и в рамките на инициативи, ръководени от водещи правителствени агенции – като Lunar Surface Innovation Initiative (LSII) на Националната администрация по въздухоплаване и изследване на космическото пространство (НАСА) Space Technology Mission Directorate и European Space Resources Innovation Centre (ESRIC), които насърчават внедряването на нови технологии, пригодени за екстремните условия на лунната среда (ISECG, 2021). Тези усилия се подкрепят допълнително от икономически фактори, като значителното намаляване на разходите за извеждане на полезен товар в околоземна и лунна орбита през

последните години (Jones, 2018), което прави реализирането на дългосрочни пилотирувани мисии все по-достижими.

В допълнение към държавните инициативи, все по-значима роля играят и частните организации – компании като Interlune, iSpace, OffWorld, Astrobotic, Lunar Outpost, Magna Petra и др. разработват технологични решения, свързани с ISRU, като се стремят да заемат водеща роля в бъдещата добивна и производствена дейност на лунната повърхност.

Луната е ключов обект на съвременната геополитическа, научна и технологична надпревара, като значението ѝ се обуславя не само от стремежа към диверсификация на източниците на стратегически минерали и усилията за изграждане на устойчива космическа икономика, базирана на In Situ Resource Utilization (ISRU), лунно базирано производство и строителство (Lunar-Based Manufacturing and Construction – LBMC) но и от стратегическото ѝ местоположение като единствен естествен спътник на Земята и най-близък космически обект.

Българското участие в съвременни програми за изследване на Луната

На 9 ноември 2023 г. България се присъедини към Споразуменията Артемида (Artemis), което представлява важна стъпка в утвърждаването на страната като активен партньор в международните усилия за изследване и устойчиво използване на Луната и космоса (Embassy of the Republic of Bulgaria, 2023). С подписването България стана 32-та държава, която се присъединява към тази международна рамка за сътрудничество подчертавайки традициите на България в областта на космическите изследвания и демонстрира воля за участие в следващата фаза от глобалното изследване на Луната – включително чрез участие в инициативи, свързани с In Situ Resource Utilization (ISRU) и изграждането на устойчива лунна инфраструктура.

Актуалността на изследванията на лунната повърхност се потвърждават допълнително и от сключения на 8 май 2025 г. Меморандум за сътрудничество между Института за космически изследвания и технологии на Българската академия на науките (ИКИТ–БАН) и Deep Space Exploration Laboratory (DSEL) от Китай (BAS, 2025).

Този контекст потвърждава не само стратегическото значение на Луната като платформа за бъдещи космически мисии, но и

необходимостта от задълбочено научно познание за нейната геоложка структура, минерален състав и потенциал за ресурсна експлоатация.

Минерален състав на лунните скали

Минералното разнообразие на лунните скали отразява сложна история на магмена диференциация, еволюция и ударни процеси. Анализът на пробите от мисиите Аполо и съветските сонди Луна, разкрива основни групи минерали, които са характерни за различни скали от лунната кора и мантия (Papike et al. 1982; Pieters et al., 2001). Според химичния състав лунните минерали са:

Основни силикатни минерали

- Пироксени с обща формула $(\text{Ca,Mg,Fe,Na})(\text{Mg,Fe,Al,Ti})(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$ (Moriarty & Pieters, 2016).
- Оливини (форстерит – фаялит) (с обща формула $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$) (Papike et al., 1982).
- Плагиоклаз ($\text{An}_{90}\text{--An}_{98}$), представен почти изцяло от анортит ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), (Donaldson et al., 2014).

Акцесорни и оксидни минерали

- Илменит (FeTiO_3) (Pieters et al., 2001).
- Хромит (FeCr_2O_4) и магнезиеви шпинели (MgAl_2O_4) (Cloutis, Sunshine & Morris 2004).
- Маскелинит (аморфна фаза на плагиоклаз) (Donaldson et al., 2014).

Минералогията на Луната е ключова за реконструкция на нейната еволюция. Разнообразието от минерали отразява не само вариациите в геохимичната среда, но и интензивността на вторични процеси като космическо изветряне и шокова метаморфоза. Тези данни са не само от фундаментално значение за разбиране на лунната еволюция, но и имат практическо приложение при планиране на бъдещи мисии, свързани с ISRU и LBMC (Papike et al., 1982; Pieters et al., 2001).

Картографиране на ударния кратер Драйдън.

Кратерът Драйдън представлява обект на научен интерес поради своята принадлежност към басейна Южният полюс – Айткен (SPA), най-големия и най-дълбок ударен басейн на Луната. В геоложката карта на североизточния сектор на SPA, изготвена от Ivanov et al. (2018), Драйдън е включен като единен полигон без вътрешна морфоложка

диференциация, поради мащаба на картографирането. В същото изследване кратерът е определен като най-младия сложен кратер в рамките на басейна Аполо (Ivanov et al., 2018).

В изследването на минералния състав на SPA Moriarty & Pieters (2018) позиционират Драйдън в хетерогенната зона на SPA. Те определят минералния състав на кратера в мащаба на SPA. В този район, доминиран от фелдшпати, се наблюдават и обогатени на пироксени участъци. Според авторите всички мафични скали в хетерогенната зона, с произход различен от морските базалти, са доминирани от богати на Mg пироксени с абсорбционни линии, центрирани при $\lambda = 960 \text{ nm}$ (1000 nm) и $\lambda = 2050 \text{ nm}$ (2000 nm), което е типично за богати на Mg пиконити и ортопироксени (Moriarty & Pieters, 2018).

Изследването на Borst et al. (2012), базирано на ултравиолетово-видими (UV–Vis) спектрални данни от мисията Clementine и камерата AMIE - Advanced-Moon micro-Imager Experiment от мисията SMART-1 - Small Missions for Advanced Research in Technology на ЕКА, установява, че в най-дълбоките части на басейна SPA, особено в централната му депресия, преобладават мафични скали, доминирани от норит. Норитът се определя като най-дълбоката стратиграфска единица, достигната от образуването на суперпонирани кратери (от лат. *superponere* - поставя, слага или полага отгоре или върху. Ударни кратери, който се образуват върху вече съществуваща кратерна структура или геоложко образуване, като частично или напълно застъпват по-старите морфоложки елементи. Наличието на суперпонирани кратери е основен стратиграфски белег, използван за определяне на относителната възраст на ударните образувания на Луната и другите планетарни тела – помладият кратер се разполага върху по-стария и по този начин маркира последователността на събитията във времето), проникващи през повърхностните слоеве от габро и анортозит, а на места – и от базалт. В това изследване кратерът Драйдън е идентифициран като самостоятелна морфоложка единица с геоложки състав, доминиран от норит (Borst et al., 2012).

Симулации, извършени от Melosh et al. (2017), сочат, че дори в най-консервативните сценарии, формирането на SPA е довело до разкриването на горната мантия на Луната, на дълбочина около 100 km. Независимо от това, спектралните наблюдения показват преобладаване на нискокалциеви пироксени (LCP), а не на оливини, което предполага,

че в контраст със Земята, горната мантия на Луната е доминирана от пироксенови фази, по-специално от LCP (Melosh et al. 2017).

1.6 Цел и задачи на дисертацията

Научна цел

Настоящото изследване има за цел да извърши картографиране и пространствен анализ на минералите и тежките метали в кратера Драйдън, разположен в басейна Аполо на обратната страна на Луната, чрез използване на дистанционни хиперспектрални данни от апарата М³. Изследването цели да установи минералния състав, скалните разновидности и геохимичното обогатяване на повърхностния материал, както и да разкрие връзките между разпределението на минерали и тежки метали и морфостратиграфските особености в кратера Драйдън.

Тази цел се постига чрез интегриране на методи от спектралната минералогия, геоинформационните технологии, планетарната геология, цифровата обработка на изображения, картографията и морфостратиграфския анализ.

Основни изследователски задачи

За реализиране на поставената цел, се формулират следните конкретни изследователски задачи:

- Литературен преглед на съвременни успешни орбитални мисии, оборудвани с пасивни оптически сензори за дистанционно изследване на Луната и нейната повърхност. Избор на апарат, данни и определяне на обект за изследване.
- Селекция, предварителна обработка и георефериране на хиперспектралните данни от М³, съвместно с топографски модел SLDEM2015, с цел осигуряване на пространствена съвместимост и коректна интерпретация.
- Извършване на топографско моделиране (определяне на наклона на терена) и изготвяне на карта на морфостратиграфските единици в кратера Драйдън.
- Изчисляване на спектрални индекси за основни минерали, скала и тежки метали, включително: анортозит; пироксени; шпинели и хромит Fe, Ti; FeO и TiO₂ (в мас. %), използвайки утвърдени алгоритми от Lucey et al. (2000), Wu et al. (2012), Pieters et al., (2014), Moriarty et al., (2023), Suárez-Valencia et al., (2024).

- Квантуване по нива и картографиране на стойностите на спектралните индекси чрез тематични карти, използващи цетова диференциация и легенди, позволяващи анализ на минералните, скалните и геохимичните единици в данните от кратера.
- Извършване на пространствен анализ (операции по налагане (overlay), обединяване (union) и премахване на граници между области (dissolve)) на връзките между стойностите на индексите и морфостратиграфските единици на кратера (централен връх, вътрешни склонове, тераси, кратерно дъно, вторични кратери и др.).
- Съпоставка на получените резултати със спектрална библиотека RELAB, с цел валидиране на спектралните характеристики и идентифициране на минералните фази.
- Анализ на геоложките процеси, повлияли върху спектралната характеристика на повърхността.
- Интерпретация на геоложката история, структура и минерално съдържание на кратера Драйдън въз основа на интегрирания спектрално-морфоложки анализ.

Тези задачи представляват логическа последователност, насочена към изпълнението на общата цел на изследването и осигуряват цялостна основа за реализацията на последващите етапи от картографирането, интерпретацията на получените резултати и анализа. Чрез систематичния подход, заложен в настоящата работа, се цели не само разширяване на познанията за конкретния изследван обект, но и разработване на приложима методика за спектрално картографиране и на други обекти и райони от лунната повърхност.

II. МАТЕРИАЛИ И МЕТОДИ

2.1 Материали

- Сателитни хиперспектрални данни от Moon Mineralogy Mapper (M³) ниво 2 M3G20090814T061444_V01_RFL (Pieters et al., 2009).
- Спектрална библиотека Reflectance Experiment Laboratory (RELAB) към университета Браун (Pieters & Hiroi, 2004; Pieters et al., 2014).
- Цифров модел на релефа (DEM) Moon LRO LOLA – SELENE Kaguya TC DEM Merge 60N60S 59m (SLDEM2015). (Barker et al., 2016).
- Глобална морфоложка мозайка на лунната повърхност с ПРС 100 m (Moon LRO LROC WAC Global Morphology Mosaic 100m) (Speyerer et al., 2018).
- Лунна координатна система (ЛКС) 104903 GCS_Moon_2000 Усреднена Земя/Полярна ос (Mean Earth/Polar axis, (ME) (ArcGIS Developers, 2024).

Използвани програмни продукти

- Environment for Visualizing Images 5.6 (ENVI) (Research Systems, 2003; Xing & Gomez, 2001).
- Quantum GIS (QGIS) (QGIS, 2023) и Mappy QGIS plugin (Penasa, 2022).
- System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA GIS) (Fisher et al., 2017)
- Lunar QuickMap (LROC QuickMap, 2023) от Applied Coherent Technology (ACT) Corporation (ACTGate, 2023)

2.2 Методи

Приложените методи включват преглед на научна литература, георефериране на данни, фотогеоложка интерпретация, топографско моделиране (определяне на наклона на терена), морфостратиграфско картографиране, анализ на пространствени зависимости и по-долу описаните подходи.

Спектрални индекси

Таблица 1. Използвани спектрални индекси

Индекс	ENVI формула	Интерпретация
Индекс за пироксени (Px)	$(b7+b32)/b19$	Високите стойности показват наличие на пироксен. Този индекс, не е предназначен за количествени измервания. (Pieters et al., 2014)
Индекс за анортозит (An)	$(b22+b47)/b34$	Високите стойности показват наличие на анортозит. Този индекс, не е предназначен за количествени измервания. (Pieters et al., 2014)
Индекс за шпинели(Sp)	$((b34-b9)/(500))*1350+b34)/b76$	Високите стойности показват наличие на шпинел. Този индекс, не е предназначен за количествени измервания. (Moriarty et al., 2023)
Индекс за желязо (IP)	$-\text{atan}(\text{atan}((b17/b9)-1.19)/(b9-0.06))$	Високите стойности на отражение посочват наличие на желязо. (Suárez-Valencia et al., 2024; Wu et al., 2012)
Индекс за FeO мас. %	$8.878*(b1^{1.8732})$	Количествен параметър за FeO мас. % (Suárez-Valencia et al., 2024; Wu et al., 2012; Lucey et al. 2000)
Индекс за титан (TP)	$\text{atan}(\text{atan}((b3/b9)-0.71)/(b9-0.07))$	Високите стойности на отражение посочват наличие на титан. (Suárez-Valencia et al., 2024; Wu et al., 2012)

Индекс за TiO ₂ мас. %	$2.6275 \cdot (b1^{4.2964})$	Количествен параметър за TiO ₂ мас. % (Suárez-Valencia et al., 2024; Wu et al., 2012; Lucey et al. 2000)
Индекс за хромит (CP)	$((b39 - b9)/600) \cdot 1500 + b39)/b79$	Високите стойности на отражение посочват наличие на Хромит. (Suárez-Valencia et al., 2024)

Тези индекси са индикативни и не следва да се интерпретират като количествена оценка на концентрацията на минерала.

Изготвяне на цветни карти на резултатите и визуализиране посредством квантуване по нива

Изготвен е цветен композит с присвоени цветове False Color Composite (FCC), (Sunshine et al., 1990; Pieters et al., 2009; Moriarty et al., 2023; Suárez-Valencia et al., 2024).

Таблица 2. Заместване на RGB каналите с индексните растерни слоеве

RGB композит съставен от индексните изображенията на пироксен, шпинел и анортозит.	R: Px G: Sp B: An	Пироксен в червено и жълто, наличие на плаггиоклаз в зелено и циан и наличие на анортозит в синьо.
--	-------------------------	--

Квантуване по нива и определяне на пространствените граници и концентрационни градиенти

FCC тематични карти са визуализирани посредством квантуване в седем нива на пикселните стойности на FeO и TiO₂ (в мас. %), обхващащи целия изчислен диапазон на индексните растерни слоеве (вж. таблица 1), като всяко ниво е представено чрез мануално назначен цвят, осигуряващ ясно визуално разграничение между различните концентрационни стойности.

Премахване на континуума в спектралните данни

Приложена е процедура по премахване на континуума за да се подобри видимостта на абсорбционните характеристики в спектрите на отражение. В програмната среда на ENVI за премахване на континуума се прилага метод основаващ се на алгоритъма на Clark и Roush (1984). В контекста на дистанционните изследвания на лунната повърхност, континуумът отразява кумулативния ефект от космическото изветряне и други повърхностни процеси, които могат да приглушат съществена спектрална информация (Pieters et al., 2000).

Извличане на спектрални криви и спектрално съпоставяне

Приложена е процедура за извличане на спектрално и отражателни характеристики (COX) от растерните данни, последвана от спектрално съпоставяне с референтната библиотека RELAB с цел идентификация и валидиране на минералния състав. Чрез анализа на характерните диагностични абсорбционни особености в спектралните криви, процесът на съпоставяне осигурява надеждно определяне на минералите (Pieters, 2000; Moriarty et al., 2023).

Анализ и интерпретация

Извършени са сравнителен, пространствен и статистически анализи (Longley et al., 2021), в резултат на което е изведена статистическа информация визуализирана в диаграми (вж. фигура 2 и 3 в глава резултати).

2.3 Първична обработка на данните

Координатна система и картографска проекция

Използвана е координатна система Mean Earth/Polar Axis (ME) GCS_Moon_2000, дефинирана от Environmental Systems Research Institute (ESRI) с идентификатор 104903 (ArcGIS Developers, 2024) и еквидистантна проекция (Snyder, 1987; Hargitai et al., 2017).

Геореферирани и пространствена обработка на данните от M³

Сателитните хиперспектрални данни M3G20090814T061444_V01_RFL.IMG са геореферирани чрез инструмента Georeference from IGM (Georeference from input geometry in NV5 Geospatial, n.d.) с помощта на файла

M3G20090814T061444_V03_LOC.IMG – съдържащ информация за географското разположение на всеки пиксел.

Извличане на подмножество от данни чрез отличителна област (ROI)

Извлечено е подмножество от данни чрез изчертаване на отличителна област (ROI) (Subsetting in NV5 Geospatial, n.d.) с цел оптимизация на работния обем от данни (Lillesand et al., 2015, p. 277).

Коригиране на данните от спектралната библиотека RELAB

Премахнати са всички измервания, намиращи се извън работния диапазон на M^3 от данните на RELAB, след което файловете са преформатирани в съответствие със структурните изисквания на ENVI. Коригираните файлове са използвани за създаване на спектрална библиотека с помощта на инструмента “Spectral Library Builder” в средата на ENVI. Съдържанието на подготвената спектрална библиотека е експортирано във формат ASCII (American Standard Code for Information Interchange).

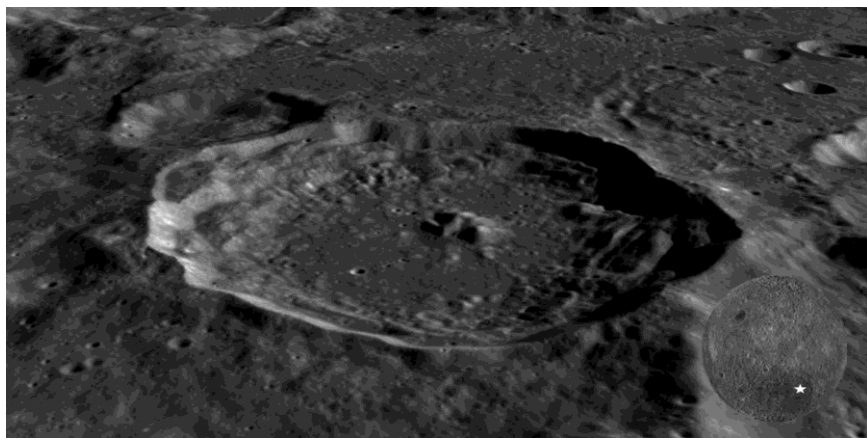
Ресемплиране на данните от спектралната библиотека RELAB

Изготвената спектрална библиотека, съдържаща коригираните спектрални криви от RELAB е ресемплирана и адаптирана спрямо спектралните характеристики на M^3 .

III. РЕЗУЛТАТИ

3.1 Морфоложко описание на ударния кратер Драйдън

Кратерът Драйдън (IAU, 2012) (33.21°S , 156.15°W) е лунна ударна структура с диаметър 54.45 km (Turtle et al., 2004; Losiak et al., 2009), разположена на обратната страна на Луната в сложната геоложка среда на басейна Аполо. Басейнът Аполо се намира в рамките на огромния басейн SPA – най-големия и най-стар ударен кратер на лунната повърхност и сред най-големите и най-стари ударни кратери в Слънчевата система (Grieve et al., 2014). Кратерът Драйдън е разположен на северозапад от центъра на басейна Аполо в непосредствена близост до вътрешния пръстеновиден рѣб на басейна. Съседните му кратери включват Plummer N на север, Scoobe на изток, Chaffee на юг и Oppenheimer на запад. Неговата възраст е изчислена на 3.68 Ga (Ivanov et al., 2018), която го поставя в рамките на късния имбриански период от лунната геохронология (Wilhelms et al., 1987) Това датиране, предложено от Ivanov et al. (2018), съвпада с определянето в Обединената геоложка карта на Луната от 2013 г. в мащаб 1:5 000 000 (Wilhelms et al., 2013), както и с актуализираната Геоложка карта на Луната от 2020 г. със същия мащаб (Fortezzo, Spudis, & Hare, 2020).



Фигура 1. Изглед под наклонен ъгъл на ударния кратер Драйдън с локацията му на обратната страна на Луната.

Анализът на цифровия модел на релефа SLDEM2015 разкри ясно изразена релефна структура с висок контраст между периферните и централните части на кратера. Минималната

надморска височина, отчетена в дъното на кратера, достига -6766 m, докато максималната, разположена по ръбовете е -2027 m. Средната стойност, изчислена за целия кратер на база трансформирани DEM данни, е -5319 m, със стандартно отклонение от 1092 m, което показва значителна вертикална изменчивост на релефа. Повече от 60% от площта на кратера е разположена в долната половина на височинния профил, което показва наличието на добре оформено и относително плоско дъно. Наклонът на терена и неговите стойности е между 0° и 42°, с най-високи стойности по вътрешните склонове на кратера. Кратерът е с равномерно разпределение на ориентацията, съответстващо на радиално симетрична структура, характерна за ударните кратери.

Морфостратиграфска карта на кратера Драйдън

Морфостратиграфската карта на кратера Драйдън (вж. приложение 3 към глава 3) представя морфоложки структурни особености на кратера, следвайки темпоралната последователност на тяхното образуване въз основа на мултиспектрални данни от орбитални апарати и цифров модел на релефа. Картата е изготвена в мащаб 1:200 000 (Tobler, 1987) и отразява съвременните повърхностни характеристики и следите от геоложки процеси.

Формиране на ударния кратер

Образуването на кратера Драйдън е резултат от сложен процес, който започва с високоскоростен и високоенергиен удар на астероид в лунната повърхност (Kring, 2023). При сблъсъка се освобождава огромно количество енергия, което води до екскавиране на значителен обем от лунната кора и до формиране на т.нар. преходна депресия – първичен кратер с форма на купа. Изчисленията показват, че проникването в повърхността е достигнало ~ 2.4 km, като първоначалната дълбочина на кратера е била приблизително 3.48 km от ръба до дъното (Losiak et al., 2009). Първичният кратер е гравитационно нестабилен и се задействат процеси, който преоформят кратера от "прост" в "сложен" тип (Wilhelms et al., 1987). Сложните кратери се характеризират с ясно изразена вътрешна структура и многокомпонентна морфология, различна от симетричната форма на купа при по-малките кратери. След образуването на преходната депресия настъпва етап на модификация, който включва две ключови гравитационно обусловени движения (Kenkmann, Collins, & Wünnemann, 2012):

- Формиране на централна издигната структура.
- Срутвање на стените на кратера.

Кратерен ръб

Ръбът на кратера Драйдън представлява затворена линия, която обгражда кратерната депресия и маркира границата между вътрешността на кратера и околния терен (Turtle et al., 2004) (вж. приложение 3 към глава 3). Състои се от разрушен, алохтонен и често фрагментиран материал, включително брекчи и разтопени скали.

Вътрешна стена, тераси и свлачища

Вътрешната стена на кратера Драйдън разкрива комплексна структура, характеризираща се със стръмни склонове (ss), вътрешни склонове (is), денудационни и деградационни процеси формирали свлачищни тераси (st) (вж. приложение 3 към глава 3). Вътрешните стени на кратера са с наклони, вариращи между 20° и 42°, докато външните склонове са значително по-полегати – между 0° и 16°. По стените на кратера са идентифицирани ротационни свлачища формирали свлачищни тераси (st) и натрупвания от материал в хълмистия терен (ht). Те се образуват по дъговидни разломи и са типични за сложните кратери (Li et al., 2023). Терасите, възникват вследствие на гравитационен колапс поради механична слабост на агрегата. В кратера Драйдън най-младата и добре изразена тераса се намира в западната част на кратера, което съответства на разбирането, че терасите най-близо до ръба са тези образували се последни (Kenkmann et al., 2014).

Дъно на кратера, хълмист терен и алохтонни отлагания

Дъното на кратера Драйдън, подобно на други сложни ударни структури на Луната, се характеризира с относително равна и слабо наклонена повърхност с наклони под 6° (вж. приложение 2 към глава 3). Особеност на района е депресия в дъното на кратера (cfd) с диаметър около 2 km и с ~200 m по-голяма дълбочина спрямо околния терен (вж. приложение 3 към глава 3). Документирани земни аналози, като кратера Брент в Канада, разкриват наличие на формирана характерна леща от ударно разтопен материал, покрита с пласт от брекчи (French, 1998). Тази стратиграфия разкрива движение на материали по време на модификационната фаза на

кратерообразуването в посока към дъното и центъра на кратера, под влияние на лунната гравитация.

Централен връх

Една от най-забележимите морфоложки характеристики на кратера Драйдън е неговият добре запазен централен връх (ссп), който се извисява с ~ 1 km над нивото на дъното на кратера и същевременно е по-нисък от кратерния ръб. Тази вертикално издигната структура се образува в резултат на еластично възстановяване и вертикално издигане на материала изграждащ лунната кора под зоната на контакт и компресия. Централният връх пробива през алохтонните ударни отлагания и съставлява ясен индикатор за механизма на формиране на сложните ударни кратери. Особеност на централния връх е изместеното му местоположение в североизточна посока, спрямо геометричния център на кратерната депресия (вж. приложение 4 и 5 към глава 3). Установеното странично изместване на централния връх на кратера е индикатор за траекторията на движение на импактора от североизток към югозапад при нисък ъгъл на удара, оценен на приблизително $20^\circ - 35^\circ$ (Kenkmann et al., 2014). В резултат на издигането на материали от дълбочина, съставът на централния връх включва скали от дълбоките слоеве на лунната кора/мантия, които при нормални обстоятелства не са изложени на повърхността (French, 1998).

Изводи относно морфологията на кратера Драйдън

1. Кратерът Драйдън е суперпониран сложен лунен ударен кратер, формиран през късния Имбриан (~ 3.68 Ga), с характерна морфология, включваща централна издигната структура, свлачищни тераси, хълмисто дъно и отчетлив назъбен и неравен кратерен ръб. Тези особености свидетелстват за сложна кратерна морфология, типична за лунни кратери с диаметър над $\sim 15-20$ km (вж. приложение 3 към глава 3).

2. Вътрешните стени са силно модифицирани чрез гравитационно обусловени денудационни процеси, като ротационни свлачища и формиране на свлачищни тераси. Това сочи към вътрешна механична слабост, подпомогната от сеизмични процеси – както ударно индуцирани, така и сеизмични и термични. Изразената тераса в западната част е показател за диахронно развитие на свличанията (вж. приложение 3 към глава 3).

3. Централният връх е добре изразен, но асиметрично разположен, което е доказателство за наклонена траектория на удара (20° – 35° от североизток към югозапад) (вж. приложение 3, 4 и 5 към глава 3) (Kenkmann et al., 2014).

4. Експулсираните отломки от кратера Драйдън са слабо изразени, като липсва „система от светли лъчи“, което се интерпретира като резултат от продължително въздействие на суперпонирани кратери, покриване с експулсирани отломки, бомбардировка от страна на малки метеорни тела (деградиране) и космическо изветряне (вж. приложение 3 към глава 3).

5. Дъното на кратера Драйдън се характеризира с относително равна, слабо наклонена повърхност, резултат от следударна модификация и гравитационно задвижени процеси. Неговата структура включва хълмист терен с локални депресии, образувани от акумулирани свлечени маси и суперпонирани кратери. Наличието на депресия в централната част и документираната леща от ударна стопилка свидетелстват за сложната следударна модификация на кратерната структура (вж. приложение 2 и 3 към глава 3) (French, 1998).

6. Геоложкият контекст на кратера Драйдън – разположен в северозападната част на басейна Аполо – го поставя в уникална позиция за изучаване на дълбоките слоеве на лунната кора/горна мантия и на продукти от най-старите ударни събития в Слънчевата система. Неговото местоположение в рамките на концентричните структури на басейна Аполо е от особено значение за реконструкцията на стратиграфията на лунната кора и тектонски процеси в района на кратера Драйдън.

7. Морфостратиграфската карта на кратера Драйдън осигурява пространствен контекст за картографиране на анортозит, минерали и тежки метали и подпомага интерпретацията и анализа на взаимовръзките между морфоложките особености на кратера и тяхното разпространение (вж. приложение 3 към глава 3 и фигури 2 и 3 на подглава 3.3).

3.2 Картографиране на пространственото разпределение на анортозит и минерали в кратера Драйдън

Картата на пространственото разпределение на минерали и анортозит в кратера Драйдън е изготвена въз основа на изчислени спектрални индекси за: анортозит (An), чувствителен към характерните абсорбционни особености на анортозит и плагиоклази; пироксени (Px), чувствителен към характерните абсорбционни

линии на пироксените при $\lambda \sim 1000$ nm и $\lambda \sim 2000$ nm, обусловени от присъствието на Fe^{2+} в кристалната решетка на минералите от пироксеновата група; шпинели (Sp), чувствителен към характерните абсорбционни линии на шпинелите, които са група оксидни минерали, стабилни при високи температури и налягания, типични за магмени и ултрабазични скали. COX на шпинелите включват отличителни абсорбционни линии при $\lambda = 460$ nm, $\lambda = 930$ nm и $\lambda = 2800$ nm (Cloutis et al., 2004). Те имат значителна петрогенетична стойност, тъй като могат да се използват като геотермометри и геобарометри, предоставящи информация за термодинамичните условия, при които са кристализирали.

Използваните индекси са индикативни и не представляват директна количествена оценка в съдържанието на изследваните повърхностни материали. Всеки от горепосочените индекси е изчислен индивидуално, като генерираните индексни растерни слоеве са обединени в RGB FCC композит, в който цветовете на каналите са разпределени по следния начин: червен (R) канал – индекс за пироксени, зелен (G) канал – индекс за шпинели и син (B) канал – индекс за анортозит ($R=\text{Px}$, $G=\text{Sp}$, $B=\text{An}$), което разпределение позволява създаване на комбинирана визуализация на интензивността на поглъщане за съответните минерали. Полученото RGB изображение е наложено (50% прозрачност) върху яркостен слой с дължина на електромагнитната вълната $\lambda = 1489$ nm, с цел постигане на по-добра визуална интеграция на спектралните и пространствени характеристики.

Картата на пространственото разпределение на минерали в кратера Драйдън (вж. приложение 9 към глава 3), разкрива различни цветови вариации, съответстващи на различни минерални състави:

В картата червените пиксели – визуализират абсорбционни особености при $\lambda = 1000$ nm и $\lambda = 2000$ nm, характерни за високо-Са, богати на Fe клинопироксени (CPX) (Klima et al., 2011; Moriarty & Pieters, 2016), свързани с наличието на „ударни стопилки“ и се наблюдават на склоновете на малък кратер, разположен на хълмистото, кратерно дъно южно от кратерния централен връх, който разкрива леща от ударна стопилка, затрупана под покриващия кратерното дъното алохтонен материал и акумулирания изветрял реголит. Липсата на вулкански структури и лавови потоци в централната депресия на кратера допълнително изключва ендегенен произход на тези клинопироксени (CPX).

В картата жълтите пиксели – визуализират абсорбционни особености при по-къси дължини ($\lambda \sim 900$ nm и $\lambda \sim 1800$ nm), указващи пироксени с по-ниско съдържание на Ca и Fe и по-високо съдържание на Mg– ортопироксени (OPX) (Klima et al., 2011; Moriarty & Pieters, 2016; Moriarty & Pieters, 2018). Тези индикации се намират на стръмните склонове на централния връх и кратерните върхове, вътрешната кратерна стена близо до хребета на кратерния ръб, склоновете на свлачищните терси, вътрешния склон и склоновете на хълмовете от хълмистия терен, което предполага изхвърляне и излагане на повърхността на субстрат, произхождащ от дълбоката лунна кора/горна мантия, по-специално високомагнезиев енстатит, който обикновено се свързва с норитови скали (Ivanov et al., 2018; Borst et al., 2013).

Районите асоциирани с наличието на енстатит са индикативни за плутонични скали, произхождащи от дълбоката лунна кора, като норита. Пространственото разпределение на жълтите пиксели разкрива съдържанието на OPX в райони с минимална степен на космическо изветряне. Централните върхове на сложните ударни кратери представляват геоложки единици с висок потенциал за експониране на дълбоки слоеве на лунната кора, поради своята генетична свързаност с процесите на вертикално издигане и еластично възстановяване след етапа на контакт и компресия. В случая с Драйдън, разположен в северозападната периферия на вътрешния пръстен на басейна Аполо, експонираните Mg-OPX представляват фрагменти от норитна интрузия (плутон), част от долната кора/горна мантия (Borst et al., 2013; Melosh et al., 2017). Този норитов пласт, разкрит под покриващите го предимно габро и анортозит е най-дълбокия слой на лунната кора, който е разкрит в басейна Аполо и подчертава научната значимост на кратера Драйдън, като ключов обект за изследване на състава и структурата на дълбоката лунна кора/горна мантия.

Пространственият анализ показва, че сините пиксели са концентрирани в райони, засенчени от стената на кратера, главно в източната и североизточната част на кратера Драйдън. Въпреки че пикселите в син цвят съответстват на потенциални райони с анортозитнеговото наличие следва да бъде критично преразгледано. Специфичните изменения в структурата на плагиоклаза в резултат на шокова метаморфоза водят до неговата трансформация в диаплектично стъкло (маскелинит), което заличава характерната абсорбционна линия около $\lambda = 1250$ nm, наблюдавана при

непроменени образци (Fritz et al., 2019). Освен това наличието на пироксени в състава на изследвания агрегат води до потискане и маскиране на COX на плагиоклаза, в резултат на спектралното доминиране на пироксеновите абсорбционни характеристики. Следователно, въпреки, че сините пиксели да визуализират наличие на анортозит възможността за невярно положителни резултати е особено висока в райони с топографски сенки, където условията на осветеност и ъгълът на регистриране значително се различават от тези в другите райони на кратера. Драйдън се намира в район, повлиян от мащабни ударни субития, в контекста на които наличието на анортозит ($\geq 90\%$ плагиоклаз) е малко вероятно, за сметка на по-разпространени агрегати съдържащи плагиоклаз, модифициран от шок метаморфизъм. В допълнение, според хипотезата за Лунния магмен океан (LMO), горната кора на Луната е доминирана от анортозит, образуван в резултат на фракционната кристализация и магмена диференциация на глобалната протолунна магмена маса (Warren, 1985). Геоложкият контекст на кратера Драйдън не подкрепя директна експозиция на първичен анортозит, поради което сините пиксели се интерпретират за невярна индикация, поради наподобяване на спектралните данни от тези пиксели на COX на анортозит.

Зелено-циановите пиксели – визуализират липса на силна абсорбция при $\lambda=1000$ nm и абсорбционни особености при $\lambda=1250$ nm и $\lambda=2000$ nm, характеризиращи агрегат в чието съдържание се намират плагиоклаз и малки количества (<5 мас. %) шпинели във фелдшпатовата матрица (Cheek & Pieters, 2014; Cloutis et al., 2004; Williams et al., 2016).

Тези пиксели са широко разпределени в кратерната депресия на Драйдън така и в прилежащия район, което предполага, че наблюдаваните спектрални характеристики отразяват регионално разпределение. Според Cloutis et al. (2004) шпинелите се характеризират с широка и дълбока абсорбционна линия, обхващаща $\lambda \sim 1250-3500$ nm, чиято интензивност и позиция зависят от съдържанието на Mg, Fe и Cr в тяхния състав. Макар и трудно различими при ниски концентрации, шпинелите оказват значително влияние върху COX, особено при наличие на абсорбционна линия около $\lambda=2000$ nm и слаба или липсваща такава при $\lambda=1000$ nm – конфигурация, типична за скали съдържащи пироксени, плагиоклаз и малки количества шпинели (Cheek & Pieters, 2014; Williams et al., 2016). Геоложкият контекст на кратера Драйдън подкрепя тази

интерпретация. Шпинелите са минерали, който се свързва с високотемпературни магмени процеси и ударно индуцирани промени в състава на лунната кора, което отговаря на комплексната геоложка история на района.

Валидиране на резултатите със спектрална библиотека RELAB

Процедурата включва извличане на COX на отделни пиксели от хиперспектралния куб на данните и тяхното съпоставяне със COX на референтни проби от спектрална библиотека RELAB. Изборът на пиксели е извършен въз основа на техните цветови стойности, представени в Картата на пространственото разпределение на анортозит и минерали в кратера Драйдън (вж. приложение 9 към глава 3), като използваното цветово кодиране отразява характерни спектрални особености на минералите.

Използвани са следните COX на пиксели и проби:

- COX на пиксел №1 (координати: колона 663, ред 17063), с присвоен син цвят (вж. приложение 10 към глава 3), е съпоставен със COX на проба 15555,965, оливин (вж. фигура 1, приложение 11 към глава 3).
- COX на пиксел №2 (координати: колона 901, ред 17029), с присвоен жълт цвят (вж. приложение 10 към глава 3), е съпоставен със COX на проба 78235,9002A, ортопироксен (норит) (вж. фигура 2, приложение 11 към глава 3).
- COX на пиксел №3 (координати: колона 1036, ред 16923), с присвоен цвят циан (вж. приложение 10 към глава 3), е съпоставен със COX на проба 76535,93b, плагиоклаз (вж. фигура 3, приложение 11 към глава 3).
- COX на пиксел №4 (координати: колона 1024, ред 17006), също с присвоен син цвят (вж. приложение 10 към глава 3), е съпоставен със COX на проба 15415,60, анортозит (вж. фигура 4, приложение 12 към глава 3).
- COX на пиксел №5 (координати: колона 839, ред 17124), с присвоен червен цвят (вж. приложение 10 към глава 3), е сравнен със COX на проба 15058,276, зелен пироксен (пижонит) (вж. фигура 5, приложение 12 към глава 3).
-

Сравнение на СОХ на пиксел №1 с референтна проба 15555,965 от оливин

Въз основа на извършеното сравнение на СОХ на пиксел №1 с референтна проба 15555,965 от оливин се установява, че СОХ на пиксел №1 не демонстрира характерните спектрални особености на оливин (Isaacson et al., 2011; Zhang & Cloutis, 2021), което изключва наличието на доминиращо съдържание на оливини в данните от съответния участък от изследваната повърхност.

Сравнение на СОХ на пиксел №2 с референтна проба 78235,9002А от ортопироксен (норит)

Резултатите от сравнителния анализ на пиксел №2 с референтна проба 78235,9002А от ортопироксен (норит) показват, че СОХ на пиксел №2 притежава характерни спектрални особености, отговарящи на тези на ОРХ от проба 78235,9002А. Абсорбционният център около $\lambda=1000$ nm съвпада при двата спектъра, докато абсорбцията при $\lambda=2000$ nm в спектъра на пиксел №2 е изместена към по-голяма дължина в сравнение с референтната проба. Това изместване се интерпретира като резултат от различия в химичния състав на ортопироксена, по-конкретно във вариациите в съдържанието на Fe и Mg (Moriarty & Pieters, 2016).

Сравнение на СОХ на пиксел №3 с референтна проба 76535,93b от плагиоклаз фелдипат

Въз основа на сравнителния анализ, се установява, че СОХ на пиксел №3 и проба 76535,93b са без ясно изразени характерни особености. Като се вземе предвид геоложката обстановка на района на кратера Драйдън – разположен в депресията на най-големия ударен басейн на Луната SPA, както и в рамките на басейна Аполо – наличието на шок метаморфизъм на плагиоклаза до маскелинит е напълно обосновано. Наблюдаваното плато в СОХ на пиксел №2 може да се интерпретира като индиректно доказателство за присъствие на над 50% плагиоклаз в агрегата, въпреки липсата на изразена абсорбционна линия (Donaldson et al. 2014; Fritz et al., 2019).

Сравнение на СОХ на пиксел №4 с референтна проба 15415,60 от анортозит

Въпреки сходството между СОХ на пиксел №4 и тези на анортозитова проба 15415,60, геоложкият контекст и морфоложката обстановка в района ни насочват към извод за липса на анортозит в

депресията на кратера Драйдън. Следователно, сините пиксели в тематичната карта се интерпретират като невярна индикация за наличие на анортозит, обусловена от комбинация от спектрални артефакти и неблагоприятни осветителни условия (Hawke et al., 2003; Anbazhagan & Arivazhagan, 2010; Donaldson et al., 2014).

Сравнение на СОХ на пиксел №5 с референтна проба 15058,276 от зелен пироксен (пиксонит)

Сравнителният анализ показва, че СОХ на пиксел №5 притежава характерни спектрални признаци, съответстващи на тези на проба 15058,276, представител на зелен клинопироксен. Наблюдава се, че центърът на абсорбция при $\lambda=1000$ nm за пиксел №5 е разположен при по-къса дължина в сравнение с този на пробата, което може да се обясни с различия в съдържанието на Са, Fe и Mg в минералния състав на CPX. От друга страна, центровете на абсорбция около $\lambda=2000$ nm на двете спектрални криви съвпадат, което допълнително потвърждава присъствието на CPX фаза със сходен химичен състав в изследвания пиксел (Moriarty & Pieters, 2016).

Изводи от сравнението на резултатите със спектрална библиотека RELAB

Извършеният сравнителен анализ между СОХ на избрани пиксели от хиперспектралния куб (вж. приложение 10, 11 и 12 към глава 3) и спектрите на референтни лунни проби от библиотеката RELAB потвърждава достоверността на резултатите от тематичната карта (вж. приложение 9 към глава 3). Получените резултати разкриват висока степен на съответствие между СОХ на отделни пиксели и СОХ лунни проби, сред които пироксени (OPX и CPX) и плагиоклаз.

Проведеното валидиране чрез сравнение със спектралната библиотека RELAB демонстрира ефективността на приложената методика за картографиране и интерпретация на минералния състав на лунната повърхност, като едновременно подчертава необходимостта от съобразяване с локалния геоложки контекст и потенциалните ограничения, свързани с условията на регистриране на данните.

3.3 Картографиране на пространственото разпределение и концентрация на тежки метали в кратера Драйдън

Картографиране на концентрацията на железен оксид (FeO) в кратера Драйдън

Химическите елементи, които са с най-силно влияние върху спектралните отражателни характеристики на лунната повърхност са Fe и Ti. В изследването се използва методиката на Lucey et al. (2000), който параметризира спектралните свойства за извличане на съдържанията на FeO и TiO₂ в сателитни данни (Lucey et al., 2000). За изготвяне на картата на пространственото разпределение на FeO мас. % в кратера Драйдън (вж. приложение 14 към глава 3) са изчислени индексни растерни слоеве за Fe и индекс представляващ количествена оценка, изразяваща съдържанието на FeO мас. % на база хиперспектралните данни (вж. таблица 1).

За целите на визуализацията и анализа на концентрацията на FeO в кратера Драйдън пикселите в растерния слой са визуализирани посредством квантуване по нива в седем стойностни интервала (нива), обхващащи целия диапазон от получени стойности, като на всяко ниво е назначен цвят с цел улесняване на визуалната интерпретация.

Разпределението на нивата и съответните цветови кодове е следното:

- Ниво 1: 0.00–3.00 мас. % – представен с пурпурен цвят
- Ниво 2: 3.01–6.00 мас. % – представен със син цвят
- Ниво 3: 6.01–9.00 мас. % – представен с циан (светлосин) цвят
- Ниво 4: 9.01–12.00 мас. % – представен със зелен цвят
- Ниво 5: 12.01–15.00 мас. % – представен с жълт цвят
- Ниво 6: 15.01–18.00 мас. % – представен с коралово-оранжев цвят
- Ниво 7: 18.01–20.69 мас. % – представен с червен цвят

Изготвената карта на пространственото разпределение на FeO мас. % служи не само като визуално средство за представяне на геохимични вариации, но и като аналитичен инструмент за интерпретация на връзките между съдържанието на FeO мас. % и морфоложките единици в кратера. Картата е използвана и за извеждане на статистически зависимости, визуализирани в диаграмата на фигура 2 подглава 3.3 с цел количествен анализ на

процентното разпределение на FeO мас. % в различните морфоложки единици на кратера.



Фигура 2. Разпределение на FeO мас. % в морфоложките единици на кратера Драйдън. За изготвяне на диаграмата векторният слой на морфоложките единици на Морфостратиграфската карта и растерният слой на Картата на пространственото разпределение на FeO мас. % са използвани за извършване на операции по налагане (overlay), обединяване (union) и премахване на граници между области (dissolve) с визуализиране концентрацията на FeO мас. % посредством квантуване по нива в три нива: ниско; 1 (0–6.99 мас. %); средно; 2 (7–13.99 мас. %) и високо; 3 (14–20.69 мас. %). Съответното ниво е привързано към морфоложката единица, в границите на която попадат неговите пикселите. Пример: „3ss“ цифрата „3“ обозначава ниво 3 с концентрация, между 14–20.69 мас. % FeO мас. % в морфоложка единица „ss“ стръмни склонове (вж. подглава 3.1 и приложение 3 към глава 3).

Изводи от картографирането на пространственото разпределение на Fe и FeO мас. % в кратера Драйдън

1. Разпределението на Fe и FeO мас. % в кратера Драйдън разкрива ясно изразена хетерогенност в повърхностния състав, отразяваща геоложките и морфоложките характеристики на района. Високите стойности на Fe и FeO мас. % са концентрирани главно в районите с голям наклон, като стръмни склонове, склоновете на

свлачищни тераси и склоновете на централния връх (вж. приложения 13, 14 и 3 към глава 3 и фигура 2, подглава 3.3).

2. Картата на пространственото разпределение на FeO мас. % показва стойности до 20.69 мас. %, със средна стойност от 17.49 мас. % и подчертава повишеното съдържание на Fe в кратера, което е от значение при планирането на бъдещи роботизирани и пилотирани мисии включващи ISRU и LBMC дейности (вж. приложение 14 към глава 3).

3. Високите стойности на индексите за Fe и FeO се свързват с експонирани мафични скални разновидности формирани дълбоко в лунната кора изложени на повърхността в резултат на ударно екскавиране (вж. приложения 13, 14 и 3 към глава 3 и фигура 2, подглава 3.3).

4. Дистанционно изследваното пространствено разпределение на FeO мас. % в кратера Драйдън е обусловено от процесите на фракционна кристализация, магмена диференциация, ударно екскавиране, транспортиране, преразпределение и последваща деградация и космическо изветряне.

5. Високите стойности на FeO (>14 мас. %) са локализирани предимно в геоложки активни райони, подложени на интензивна деградация и денудация. Това включва стръмните вътрешни склонове, склоновете на свлачищните тераси и склонове на вторични кратери, където се разкриват „свежи“ субстрати с по-ниска степен на изветряне (вж. приложения 14 и 3 към глава 3 и фигура 2, подглава 3.3).

6. Ниските стойности на FeO се регистрират в равните и слабо наклонени повърхности, по-специално в дъното на кратера и са свързани с натрупване на силно изветрял, финозърнест реголит и отложено наноразмерно желязо (npFe^0), които повишават спектралния фон и затрудняват откриването на Fe^{2+} (вж. приложения 14 и 3 към глава 3 и фигура 2, подглава 3.3).

7. Статистически е изведена връзка между морфоложките единици и концентрацията на FeO мас. %, като ~92% от пикселите с високи стойности на FeO мас. % попадат в райони със стръмни склонове (вж. фигура 2, подглава 3.3).

Картографиране на концентрацията на титанов диоксид (TiO₂) в кратера Драйдън

След изчисляване на индекса за TiO₂ мас. % (вж. таблица 1) е съставена тематична карта на пространственото разпределение на TiO₂ мас. % в кратера Драйдън (вж. приложение 16 към глава 3). За

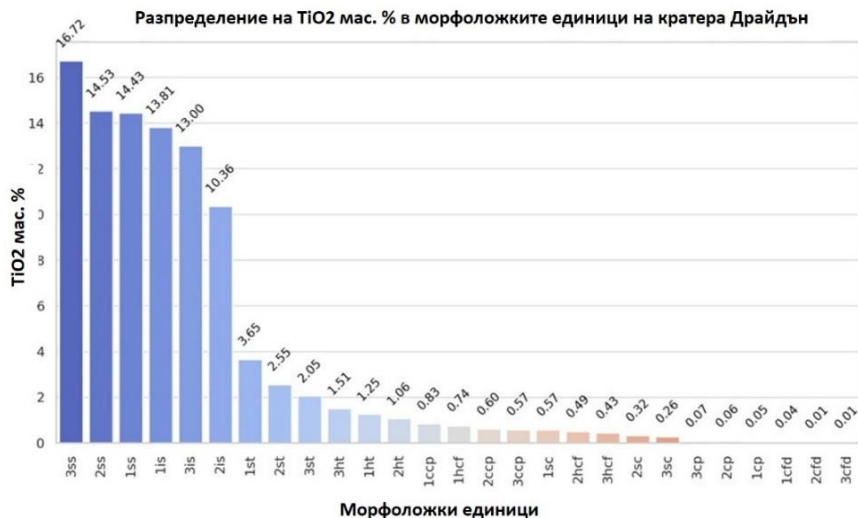
разлика от използваните индикативни спектралните индекси използваният тук индекс за TiO_2 мас. % дава в резултат количествена оценка на концентрацията на TiO_2 мас. % въз основа на хиперспектралните данни. Получените стойности на TiO_2 мас. % варират в диапазона от 0.00 мас. % до 18.29 мас. % и показват различия в геохимичния състав на повърхностните агрегати в рамките на кратера. В контекста на геоложките изследвания индексът за TiO_2 мас. % е полезен инструмент за определяне на минералния състав на скалите. Той е особено полезен при анализа на магмени и мафични скали, където TiO_2 често се съдържа в състава на минералите илменит и перовскит.

За целите на визуализацията и анализа на концентрацията на TiO_2 в кратера Драйдън пикселите в растерния слой са визуализирани посредством квантуване по нива в седем стойностни интервала (нива), обхващащи целия диапазон от получени стойности, като на всяко ниво е назначен цвят с цел улесняване на визуалната интерпретация.

Разпределението по нива и съответните назначени цветови кодове е следното::

- Ниво 1: 0.00–3.00 мас. % – пурпурен цвят
- Ниво 2: 3.01–6.00 мас. % – син цвят
- Ниво 3: 6.01–8.00 мас. % – циан (светлосин) цвят
- Ниво 4: 8.01–11.00 мас. % – зелен цвят
- Ниво 5: 11.01–13.00 мас. % – жълт цвят
- Ниво 6: 13.01–16.00 мас. % – коралово-оранжев цвят
- Ниво 7: 16.01–18.29 мас. % – червен цвят

Изготвената карта на пространственото разпределение на TiO_2 мас. % служи не само като визуално средство за представяне на геохимични вариации, но и като аналитичен инструмент за интерпретация на връзките между съдържанието на TiO_2 мас. % и морфоложките единици в кратера. Картата е използвана и за извеждане на статистически зависимости, визуализирани в диаграмата на фигура 3, подглава 3.3 с цел количествен анализ на процентното разпределение на TiO_2 мас. % в различните морфоложки единици на кратера



Фигура 3. Разпределение на TiO₂ в морфоложките единици на кратера Драйдън. За изготвяне на диаграмата векторният слой на морфоложките единици на Морфостратиграфската карта и растерният слой на Картата на пространственото разпределение на TiO₂ мас. % са използвани за извършване на операции по (операции по налагане (overlay), обединяване (union) и премахване на граници между области (dissolve)) с разделяне концентрацията на TiO₂ посредством квантуване по нива в три нива: ниско 1 (3 – 7.99 мас. %); средно 2 (8 – 12.99 мас. %) и високо 3 (13 – 18.29 мас. %). Съответното ниво е привързано към морфоложката единица, в границите на която попадат неговите пикселите. Пример: „3ss“ цифрата „3“ обозначава ниво 3 с концентрация между 13 – 18.29 мас. % TiO₂ в морфоложка единица „ss“ стръмни склонове (вж. подглава 3.1 или приложение 3 към глава 3).

Изводи от картографирането на пространственото разпределение на Ti и TiO₂ в кратера Драйдън:

8. Картите на Ti и TiO₂ мас. % разкрива ясно изразена хетерогенност в повърхностния състав, отразяваща геоложките и морфоложките характеристики на района. Високите стойности на Ti и TiO₂ мас. % са концентрирани главно в районите с голям наклон, като стръмни склонове, склоновете на свлачищни тераси и склоновете на централния връх на кратера Драйдън, като концентрациите варират от 0,00 до 18,29 мас. %, със средна

стойност 3,81 мас. %. (вж. приложения 15, 16 и 3 към глава 3 и фигура 2, подглава 3.3).

9. Максималните стойности на TiO_2 мас. % са по-високи в сравнение с предходни докладвани стойности, докато средната стойност от 3,81 мас. % остава умерена, което съответства на общия геохимичен фон на агрегатите на лунната повърхност (вж. приложение 16 към глава 3).

10. Получените стойности на TiO_2 са концентрирани в геоморфоложки активни зони – стръмни склонове (45,68 % от пикселите), вътрешни склонове (37,17 %) и свлачищни тераси (8,25 %). Това разпределение разкрива отчетлива корелация между наклона на терена и пространственото разпределение на TiO_2 в кратера Драйдън. Установената зависимост е в съответствие с резултатите от предходни изследвания (напр. Wang et al., 2017; Osinski et al., 2023), които подчертават значението на наклонените терени за експониране на „свеж“ субстрат (вж. приложения 15, 16 и 3 към глава 3 и фигура 3, подглава 3.3).

11. Дъното на кратера е покрито с по-тъмен агрегат, чиито ниски стойности на TiO_2 мас. % са в съответствие с наличие на финозърнест, силно изветрял реголит, подложен на космическо изветряне и отлагане на наноразмерно желязо (npFe^0) (вж. приложение 16 и 3 към глава 3 и фигура 3, подглава 3.3).

12. Радиационното увреждане на оптичните и електронните компоненти на M^3 , шумът в данните, преекспонирането, наличието на сенки, обратното разсейване на светлина и високото съдържание на FeO са сред основните фактори, които могат да доведат до повишаване на стойностите на TiO_2 .

Карта на пространственото разпределение на хромит в кратера Драйдън

Индексът за хромит (вж. таблица 1) се основава на COX на хромита, подобни на тези на шпинелите, но с абсорбционни линии локализиращи в по-големи λ . Индексът е съотношение между канали, което включва екстраполирана стойност при $\lambda=1500$ nm използвайки, наклона на спектралната крива между $\lambda=750$ nm и $\lambda=1300$ nm, и стойността на отражението при $\lambda=2750$ nm, с което се отчитат и визуализират области с по-висока стойност на поглъщане при $\lambda=2000$ nm в сравнение с останалите стойности на поглъщане (Suárez-Valencia et al., 2024).

След изчисляването на индекса за хромит е изготвена карта на пространственото му разпределение в кратера Драйдън (вж. приложение 17 към глава 3). В тематичната карта, визуализирана чрез черно-бяла градиентна скала, пикселите в бяло-сиви тонове отразяват най-високи стойности на индекса за хромит, което се дължи на наличието на агрегати, съдържащи хромит, произхождащи от дълбоката лунна кора и горната мантия. Обратно, пикселите в черен цвят маркират области с най-ниски стойности на индекса. Следва да се подчертае, че този индекс има индикативен характер и не предоставя количествена оценка на концентрацията на хромит. Независимо от това, визуалното представяне дава възможност за бърза и ефективна интерпретация на пространственото разпределение на индекса за хромит в кратера Драйдън.

С цел по-прецизна и отчетлива визуализация на зоните с повишено съдържание на хромит в кратера Драйдън, е дефиниран конкретен стойностен диапазон от спектралния индекс за хромит, чрез използване на функционалността Raster Color Slice. За тази цел са зададени параметри на хистограмата (Slice Min/Max), ограничаващи визуализираните пикселни стойности в интервала от 1.20 до 1.57. На този диапазон е назначен зелен цвят, с което се постига ясно разграничаване на пикселите, отговарящи на най-високите стойности на индекса за хромит. В резултат е генериран нов тематичен растерен слой, в който пикселите, визуализирани в зелен цвят, са тези в чието съдържание данните показват повишени стойности на индекса за хромит.

Изводи от картографирането на пространственото разпределение на хромит в кратера Драйдън

1. Изчисленият спектрален индекс за хромит позволява ефективна визуализация на районите, в които е регистрирана повишена абсорбция характеризираща наличието на хромит, показващи наличието на хромит-съдържащи агрегати с произход от дълбоката лунна кора и горна мантия (вж. приложения 17 и 18 и 3 към глава 3).

2. Пикселите с най-високи стойности на индекса за хромит са концентрирани по склоновете на кратера и кратерния ръб (особено изявено в тяхната северна част). Този резултат е в подкрепа на ключовата роля на склоновете за експониране на „свеж“ субстрат (вж. приложения 17 и 18 и 3 към глава 3).

3. Пространственото разпределение на хромит в посока североизток–югозапад, съответстващо на движението на импактора, показва, че екскавационният процес е довел до преразпределение и експониране на хромит-съдържащ субстрат от дълбоката лунна кора (вж. приложения 17 и 18 и 3 към глава 3).

4. Равните и слабо наклонени повърхности са покрити с изветрял реголит и се характеризират с ниски стойности на индекса за хромит. Това се дължи на потискането, приглушаването и маскирането на СОХ на хромита в резултат на космическо изветряне и отлагане на наноразмерно желязо (npFe^0) (вж. приложения 17 и 18 и 3 към глава 3).

5. Интегрираният анализ на хромит, Fe, FeO, Ti и TiO₂, в контекста на морфоложките и топографски характеристики, осигурява база за реконструкция на геоложката история на кратера и идентификация на райони с ISRU (In Situ Resource Utilization) потенциал за добив и използване на местни ресурси.

3.4 Геолого-минераложка интерпретация на кратера Драйдън

Кратерът Драйдън отразява ключови етапи от еволюцията на лунната кора в басейна Аполо, разположен в североизточната част на басейна Южният полюс – Айткен (SPA). Лунната протогора се е формирала в резултат на процеси на фракционна кристализация и магмена диференциация, протекли в глобалния Лунен магмен океан. Последвалото образуване на басейна SPA е довело до мащабно екскавиране на дълбоки слоеве от лунната кора, което според изследванията на Melosh et al. (2017) е разкрило и горната мантия. В по-късен етап се образува басейнът Аполо, чието формиране екскавира и разкрива още по-дълбоки слоеве, създавайки регион с минимална дебелина на лунната кора в рамките на SPA. Кратерът Драйдън се формира от следващо ударно събитие, в непосредствена близост до пръстеновидния кратерен връх на басейна Аполо. В резултат на това се разкриват скални разновидности от значителна дълбочина, включително материали от долната кора и горната мантия, експонирани в централния връх на кратера.

Ударното образуване на кратери е основният екзогенен геоложки процес, формиращ топографията и морфологията на лунната повърхност. Ударният кратер Драйдън е сложна структура, формирана в резултат на високоскоростен сблъсък на импактор с лунната повърхност в северозападния район на басейна Аполо, в

непосредствена близост до вътрешния му пръстеновиден кратерен връх . Той е суперпониран сложен ударен кратер с централен връх и свлачищни тераси.

След етапите на контакт, компресия и екскавация, скалните маси под зоната на въздействие започват процес на еластично възстановяване и вертикално издигане, което води до формиране на централен връх – характерна морфоложка единица на сложните ударни кратери. В резултат на механичната слабост на кратерните стени, гравитационното въздействие, лунотресения, термичните амплитуди между лунния ден и нощ, както и последващи ударни събития се формират ротационни свлачища. Свлечените маси частично затрупват кратерното дъно, стабилизират се и формират алохтонен слой, покриващ дъното на кратера. Част от тези маси запазват вътрешна кохезия и формират характерни свлачищни тераси по склоновете на кратерната стена.

При формирането на кратера Драйдън се екскавират и експулсират скалите на дълбочина от 2,4 km, като към повърхността се транспортира субстрат със COX типични за Mg-OPX (енстатит). Това е показателно за наличие на богат на Mg норит, с произход от дълбоката лунна кора и/или горна мантия (Melosh et al., 2017), които са част от норитен плутон, който е стратиграфски разположен в основата на басейна Аполо и басейна SPA, под слоеве габро/базалт и анортозит. По-равните и слабо наклонени повърхности на кратера Драйдън са покрити с реголит, съставен от изагубили характерните си спектрални отражателни характеристики (COX) минерали в резултат на космическо изветряне. Постоянната експозиция на лунната повърхност на микрометеороидни удари, галактически и слънчеви въздействия води до прогресивно космическо изветряне на реголита, включващо формиране на аглутинати (стъкловидни агрегати) и отлагане на наноразмерно желязо (npFe^0) – процеси, които модифицират както физичните, така и спектрални свойства на лунния реголит.

Въпреки тях, постоянната бомбардировка от малки метеорни тела деградира повърхностния слой от реголит и разкрива както „свежи“ субстрати така и лещата от ударна стопилка формирана при образуването на Драйдън. Това се наблюдава в резултат на спектралната индикация на CPX в депресията на малкия, суперпониран кратер с диаметър ~ 1 km, разположен на юг от централния връх в кратерното дъно на Драйдън. Стойностите на

FeO, TiO₂ и хромит са високи и в подкрепа на наличието на мафични минерали с произход от дълбоката лунна кора и/или горна мантия.

Изследването на Moriarty & Pieters (2018) определя кратера като част от т.нар. хетерогенен пръстен на SPA — за който са характерни скали съдържащи плагиоклази и пироксени, които Moriarty & Pieters (2018) определят за Mg-OPX произхождащи от дълбоките слоеве на лунната кора и горна мантия.

В своето изследване Borst et al. (2012) определят скалния състав на Драйдън за доминиран от норит – плутонична скала, съставена основно от ортопироксен и плагиоклаз. Това потвърждава, че ударният процес е разкрил скали от дълбоката лунна кора, преминавайки през покриващите я слоеве от габро/базалт и анортозит (Borst et al. 2012; Moriarty & Pieters 2018).

Симулациите на Melosh et al. (2017) показват, че образуването на SPA би трябвало да е разкрило горната мантия, но доминиращата COX в региона е на нискокалциеви пироксени (LCP), а не оливини. В този контекст резултатите за кратера Драйдън, съдържащ главно норит, са в подкрепа резултатите на Melosh et al. (2017), които изграждат основа за преосмисляне на парадигмата за лунна мантия с високо съдържание на оливини.

Резултатите, показващи средна стойност за FeO от ~17 мас. % и TiO₂ от ~3 мас. %, подкрепят наличието на мафични скални разновидности с евентуален мантиен произход, обогатени на TiO₂. Данните от Clementine и Lunar Prospector потвърждават геохимичните аномалии в басейна SPA (Lucey et al., 1998; Lawrence et al., 2002) и макар Драйдън да се намира в североизточната част на SPA, геохимичните аномалии в района са важни индикатори за състава на по-дълбоките слоеве на лунната кора и горна мантия, изложени на повърхността в резултат на формирането на суперпонирани ударни кратери.

Резултатите от картографирането на кратера Драйдън посредством използването на сателитни хиперспектрални данни от M3 показват наличие на Mg-OPX в състава на норитови скали част от хетерогенния пръстен на SPA. Драйдън разкрива дълбоките слоеве на лунната кора и/или горна мантия (Melosh et al. (2017) и подпомага реконструкцията на стратиграфската и термична еволюция на лунната кора в южната полусфера на обратната страна на Луната.

IV. ИЗВОДИ, ЗАКЛЮЧЕНИЯ И ПРИНОСИ

4.1 Обобщени научни изводи

Морфологията на кратера Драйдън потвърждава, че неговата структура отговаря на характеристиките на сложен ударен кратер. Идентифицирани са морфоструктурни единици, включително: централен връх с асиметрично разположение; свлачищни тераси, формирани по вътрешните стръмни склонове; назъбен и неравен кратерен ръб; хълмист терен в основата на вътрешната стена на кратера; неравно, хълмисто кратерно дъно; локализираните депресии в кратерно дъно; както и малки, суперпонираните ударни кратери, разположени в рамките на кратерната депресия (вж. приложение 2 и 3 към глава 3).

Морфостратиграфията на кратера Драйдън разкрива, че формирането на депресията и кратерното дъно предхожда това на централния връх и кратерния ръб. Механичната нестабилност на вътрешните кратерни склонове води до образуването на ротационни свлачища, резултат от гравитационно задвижени процеси, които формират хълмист терен както в основата на склоновете, така и по самото кратерно дъно. Свлачищните тераси по стръмните вътрешни стени, допринасят за формирането на съвременния назъбен и неравен кратерен ръб. Допълнителен процес по реформиране на кратерната депресия е образуването на малки, суперпонираните ударни кратери (вж. приложение 2 и 3 към глава 3).

Картографирането на пространственото разпределение на минерали и анортозит в кратера Драйдън, на база спектралните данни от M^3 , разкрива изразена минерална хетерогенност, представена от четири основни компонента: клинопироксени (CPX), ортопироксени (Mg-OPX), плагиоклаз и шпинел. Пространственото разпределение на тези минерални асоциации показва силна корелация с основните морфоложки единици на кратера, което подчертава структурно-минералната взаимовръзка в кратерния релеф (вж. приложение 9 към глава 3).

- Клинопироксените (CPX) са асоциирани с ударни стопилки, концентрирани в лещовидно тяло, разположено под покриващия кратерното дъно агрегат, както и в по-късно образувани малки ударни кратери. Липсата на вулкански структури в изследваната зона потвърждава екзогенния (ударен) произход на CPX.

- Ортопироксените (Mg-OPX) са локализирани основно по стръмните вътрешни склонове и в зоната на централния връх. Техните COX се свързват с дълбоко разположено норитово плутонично тяло съдържащо енстатит, свидетелстващо за експониране на геоложка единица от дълбоката лунна кора/горна мантия.
- Установеното широко пространствено разпределение на плагиоклаз в асоциация с шпинел, при отсъствие на спектрални признаци за чист анортозит, е индикатор за сложен генезис и дълбок произход на агрегата покриващ изследвания район.

Картографирането на пространственото разпределение и концентрация на тежки метали в кратера Драйдън, на база спектралните данни от M³, разкрива изразена хетерогенност в разпределението на Fe, FeO, Ti, TiO₂ и хромит. Мас. % на FeO и TiO₂ достигат максимални стойности по стръмните вътрешни склонове на кратера, докато равните и слабо наклонени повърхности се характеризират с приглушени COX, типични за космически изветрял реголит (вж. приложение 2, 14, 15 и 18 към глава 3).

- Пространственото разпределение на Fe, FeO, Ti, TiO₂ и хромит очертава локализирани обогатявания по стръмни наклонени терени, които съвпадат с експонирани мафични минерали и скали произхождащи от дълбоките слоеве на лунната кора и горната мантия. Установената положителна корелация между наклона на терена и мас. % на FeO и TiO₂ (вж. фигура 2 и 3 и приложение 2, 3, 14 и 16 към глава 3) потвърждава значимото влияние на денудационните и деградационни процеси за разкриване на по-слабо изветрели субстрати.

Геологията на кратера Драйдън обосновава неговото определяне като суперпониран сложен ударен кратер, формиран в резултат на основния екзогенен геоложки процес формиращ лунната повърхност – високоенергийното ударно образуване на кратери.

- Процесът на формиране на кратера е протекъл при изключително високи налягания и температури, които водят до експулсиране на скален материал, синтез на ударна стопилка и обогатяване с химични елементи, привнесени от импактора. Тези продукти се концентрират в лещовидна структура, разположена под агрегата, покриващ кратерното дъно. Едновременно с това се транспортира субстрат към централния

връх, който разкрива скали с произход от дълбоките хоризонти на лунната кора и горната мантия (норит) – пряко доказателство за проникване на ударната енергия в дълбочина (вж. приложение 3, 9, 14 и 16 към глава 3).

- Липсата на вулканични продукти в кратерната депресия, както и установената шокова метаморфоза на плагиоклаза (включително трансформация до маскелинит), подкрепят интерпретацията за чисто екзогенен (ударен) генезис.
- Дистанционните данни разкриват признаци на следударна геоложка активност, изразяваща се в денудация по вътрешните стръмни склонове на кратера. Тези гравитационно задвижени процеси водят до образуване на ротационни свлачища и оформяне на характерни свлачищни тераси, които разкриват свеж, неизветрял субстрат.

4.2 Заключение

Чрез интегриране на хиперспектрални данни от инструмента Moon Mineralogy Mapper (M^3), цифров модел на релефа (SLDEM2015), използване на диагностични спектрални индекси, спектрална библиотека RELAB, и глобална морфоложка мозайка на Луната (Moon LRO LROC WAC Global Morphology Mosaic 100m) е извършено комплексно картографиране на морфологията, минералния състав и наличието на тежки метали в лунния ударен кратер Драйдън, разположен в северозападната част на басейна Аполо на обратната страна на Луната.

Изготвената морфостратиграфска карта позволи разграничаване на морфоложките единици на кратера Драйдън и последователността на тяхното образуване. Картата осигури пространствен контекст за съпоставяне с тематичните карти на разпределението на минерали и тежки метали, подпомагайки интерпретацията на генетичните връзки между морфологията и състава на кратера.

Изготвените тематични карти на пространственото разпределение на минерали, анортозит и тежки метали разкриха минералната хетерогенност на кратера Драйдън. Позволиха откриването на корелация между районите с висока концентрация на FeO и TiO₂ и районите с активни гравитационни процеси. Резултатите разкриват наличие на минерали с произход от дълбоките

слоеве на лунната кора/горна мантия съдържащи Fe, Mg, Al, Ca, Si, O, Cr, Ti и др.

Сложната морфология на кратера и минералната хетерогенност са резултат от фракционна кристализация, ударна екскавация, ударно топене, блокова тектоника (еластично възстановяване и вертикално издигане), както и от денудация, включваща гравитационни и механични процеси, деградация и космическо изветряне.

4.3 Научни и научно-приложни приноси

- Разработена, приложена и изпитана е методика за тематично картографиране на минерали и тежки метали чрез сателитни хиперспектрални данни от M³, както и за тематично картографиране на морфостратиграфията на лунен ударен кратер чрез цифров модел на релефа и сателитни мултиспектрални данни.
- Въведен и изпитан е подход за валидиране на сателитни COX с лабораторни данни от RELAB.
- Изготвени са: морфостратиграфска карта, индексни карти на пространственото разпределение на пироксени, плагиоклаз, шпинели, хромит, FeO и TiO₂ в кратера Драйдън с висока разделителна способност.
- Идентифицирани са преки пространствени зависимости, в данните от M³ от кратера Драйдън, между пространственото разпределение на FeO и TiO₂ и склоновете на кратера.

4.4 Публикации

Иванов, И., & Филчев, Л. (2022, октомври). Дистанционни изследвания на полезни изкопаеми на Луната. В *Eighteenth International Scientific Conference SPACE, ECOLOGY, SAFETY – SES 2022* (стр. 204–210). София, България: Институт за космически изследвания и технологии, Българска академия на науките.

Иванов, И. (2023). Обзор на спектрометри и камери регистриращи отразена електромагнитна радиация на борда на лунни орбитални сателити [Overview of imaging spectrometers and cameras recording reflected electromagnetic radiation on board lunar orbiting satellites]. В *Сборник доклади от научна конференция „Близкият космос – обща цел“, 11–12 май 2023 г., Велико Търново* (стр. 73–83).

Ivanov, I., & Filchev, L. (2024). In-flight and on-orbit calibration of lunar imaging spectrometers – A review. *Aerospace Research in Bulgaria*, 36, 210–223. Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences. ISSN 1313-0927.

Иванов, И., & Филчев, Л. (2024, октомври). Стандартизирана лунна координатна система – обзор. В *Proceedings of the Twentieth Anniversary International Scientific Conference Space, Ecology, Safety – SES 2024* (стр.192–197). София, България: Институт за космически изследвания и технологии, Българска академия на науките.

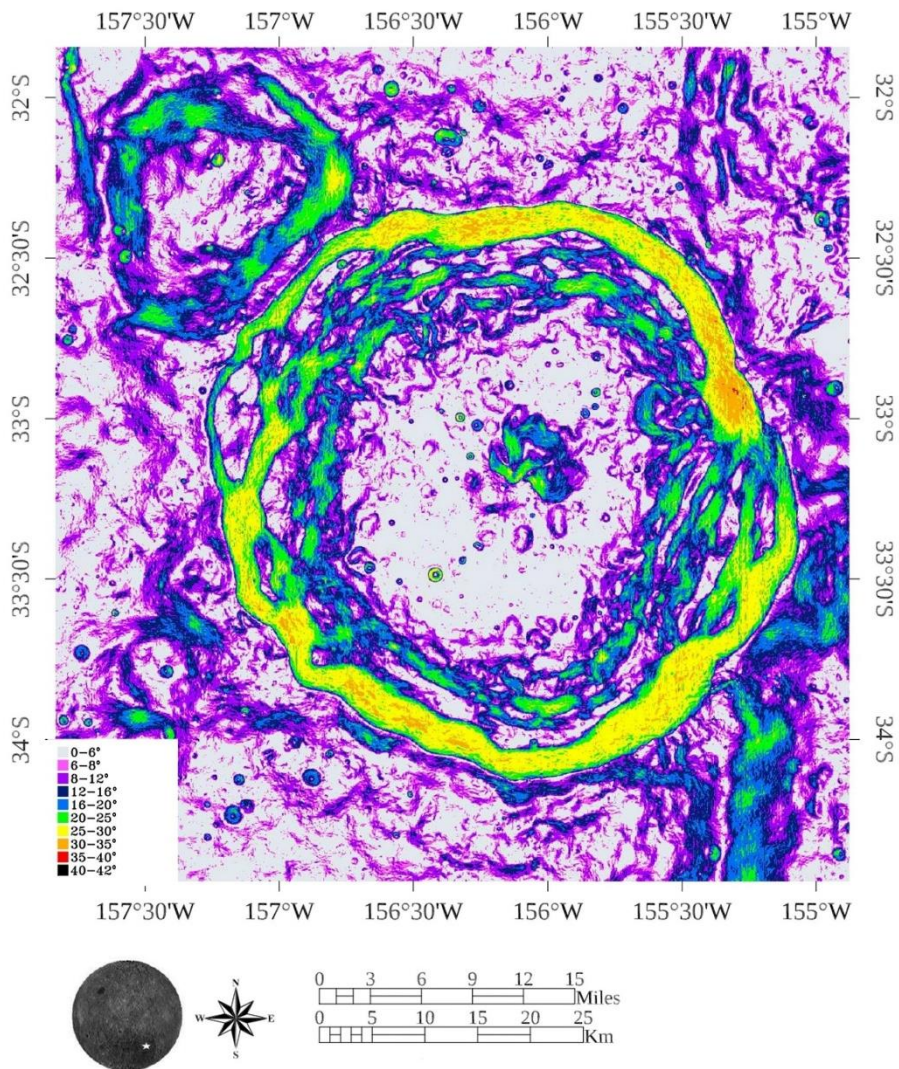
Ivanov, I., & Filchev, L. (2024). Geomorphological structural mapping of Dryden Crater on the Moon using Mappy Tool plugin in QGIS software. In B. Bayram, K. Becek, & G. Arampatzis (Eds.), *Proceedings of the IV International Symposium on Applied Geoinformatics – ISAG2024* (pp. 60–64). Wroclaw University of Science and Technology: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. <https://doi.org/10.37190/ISAG2024>

V. ПРИЛОЖЕНИЯ

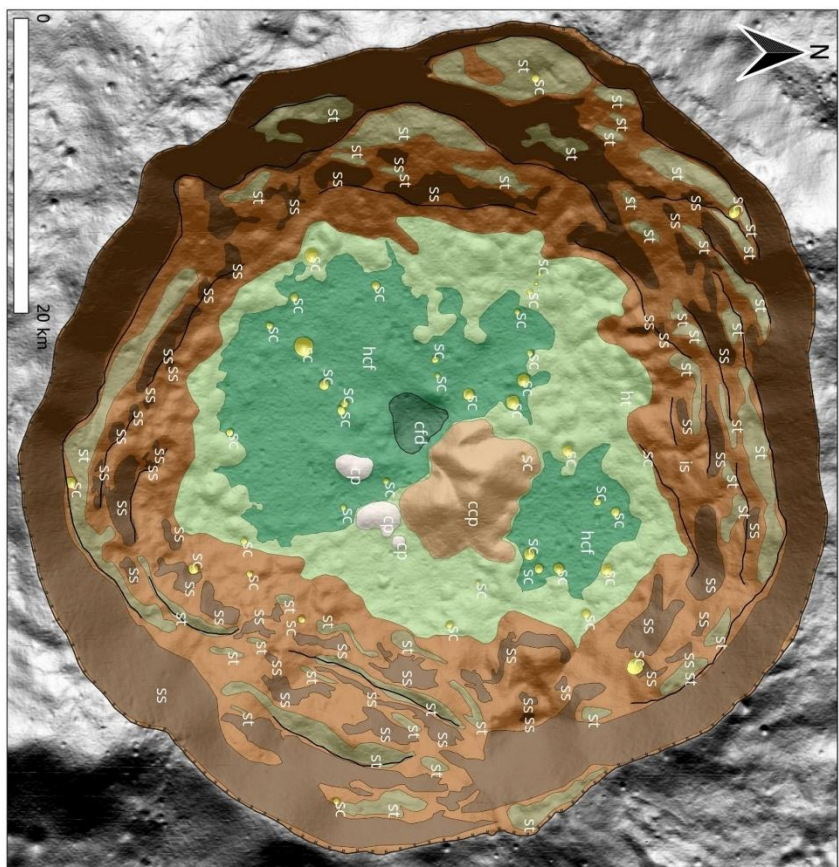
5.3 Приложения към глава 3 РЕЗУЛТАТИ

Приложение 2 към глава 3. Карта на наклона на склоновете на кратера Драйдън

Карта на наклона на склоновете на кратера Драйдън



Приложение 3 към глава 3. Морфостратиграфска карта на кратера Драйдън



Морфостратиграфска карта на кратера Драйдън

Морфоложки единици

- ss - Стратини селенове
- st - Тераси от селачищен тип
- sc - Малки кратери
- ls - Вырешен екран
- ht - Хълмист терен
- cpr - Централен връх на кратера
- ccr - Външностени центрилни върхове
- hcf - Хълмисто дъно на кратера
- cfd - Депресия в дъното на кратера

Геоложки контакти

Навезкини

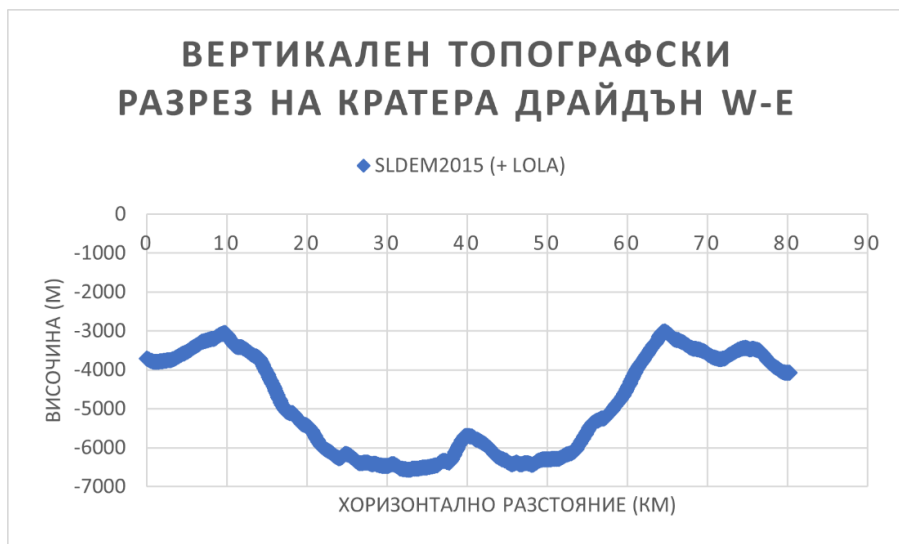
Линейни форми

- Хребет на кратерния ръб
- Ридол
- Депресия в дъното на кратера

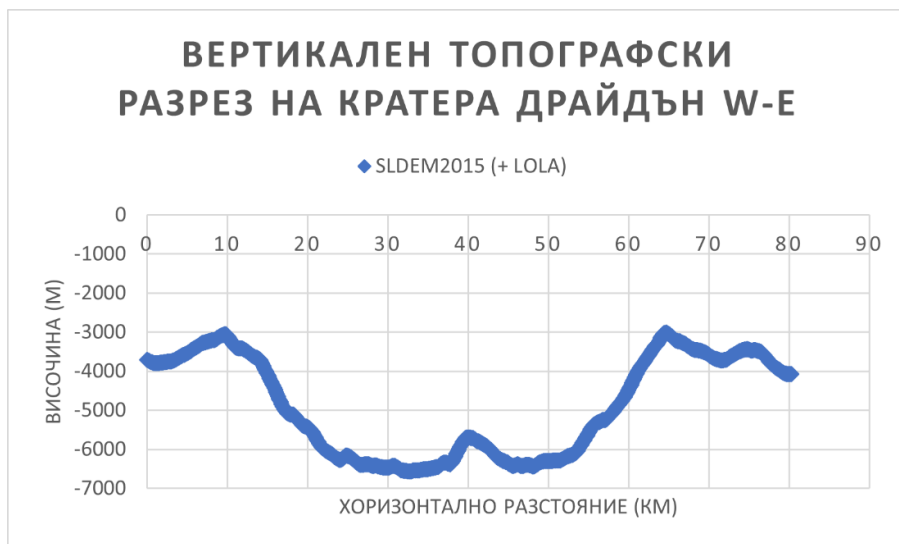


Местоположение на кратера
Обратна страна на Луната
Ширинна, дължина
(33,21° ю. ш., 156,15° з. д.)

**Приложение 4 към глава 3. Вертикален топографски разрез
на кратера Драйдън N-S**

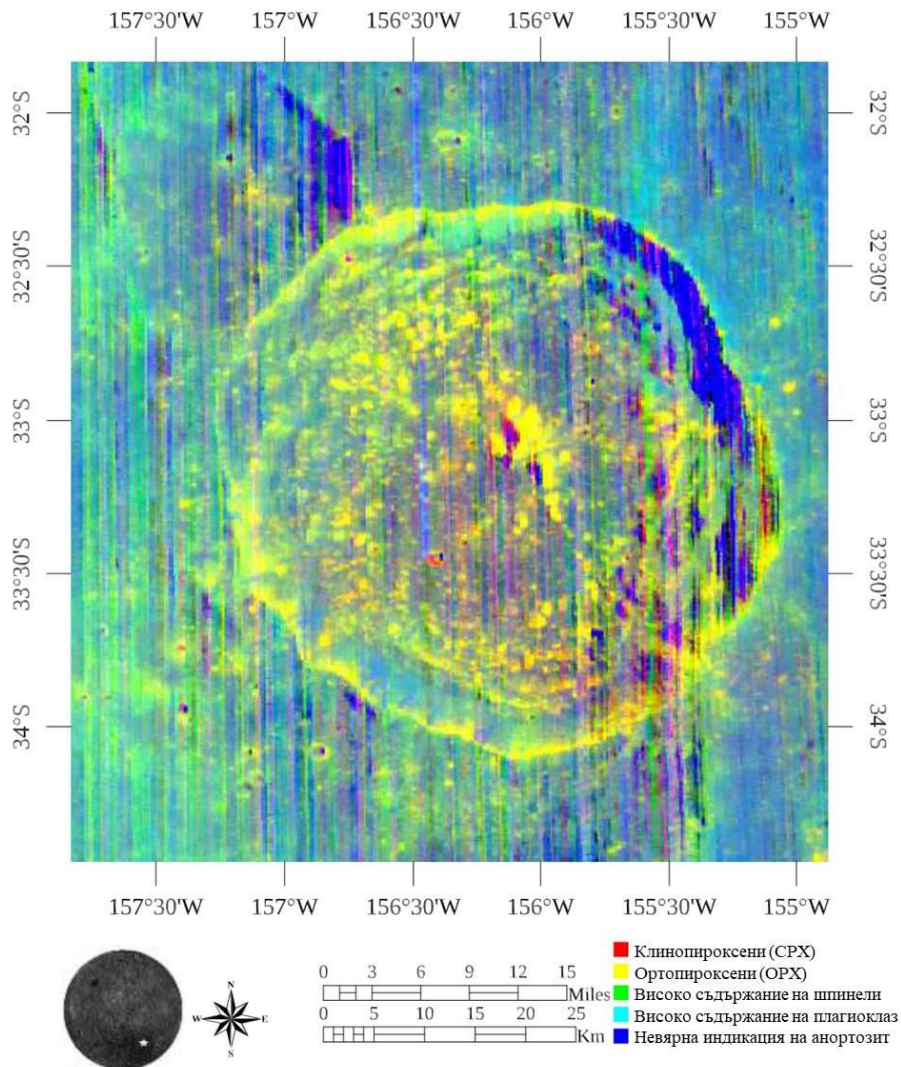


**Приложение 5 към глава 3. Вертикален топографски разрез
на кратера Драйдън W-E**



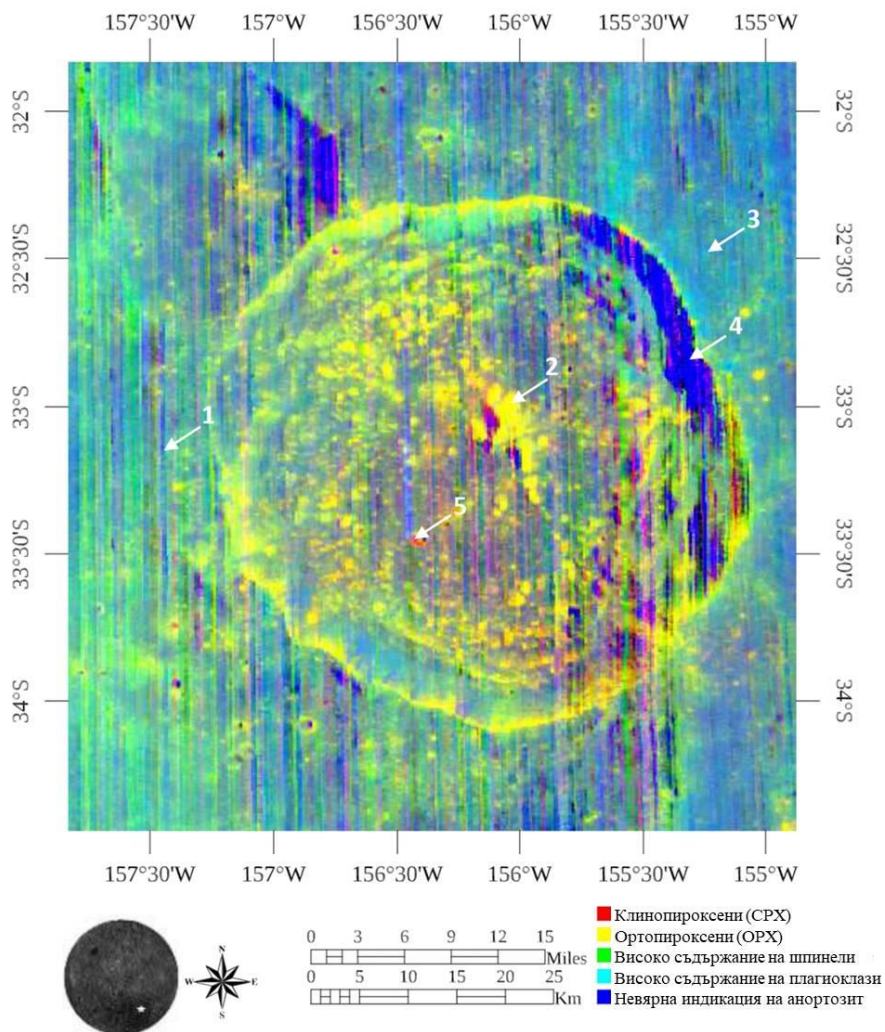
Приложение 9 към глава 3. Карта на пространственото разпределение на анортозит и минерали в кратера Драйдън

Карта на пространственото разпределение на анортозит и минерали в кратера Драйдън

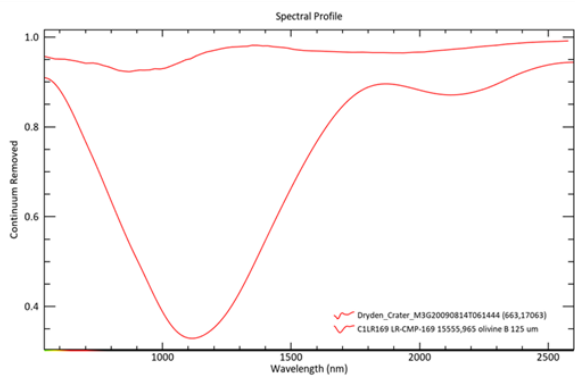


Приложение 10 към глава 3. Карта на пространственото разпределение на минерали в кратера Драйдън с посочване на пикселите, от които са извлечени спектралните криви

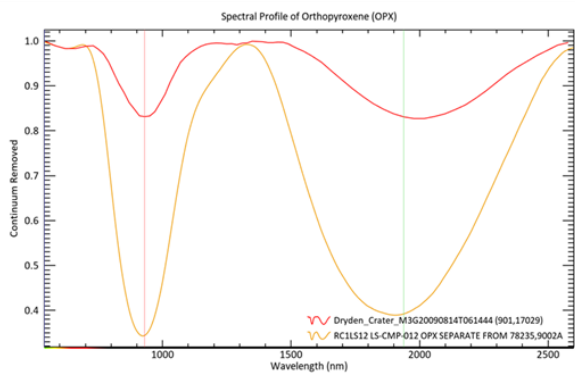
Карта на местоположенията на ползваните пикселни COX за верификация с RELAB



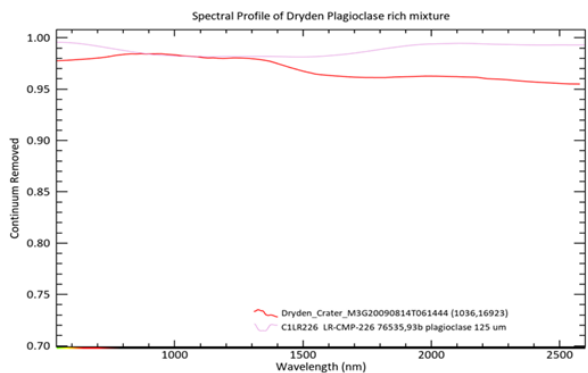
Приложение 11 към глава 3. Спектрални криви, извлечени от пиксели



Фиг. 1 Оливин

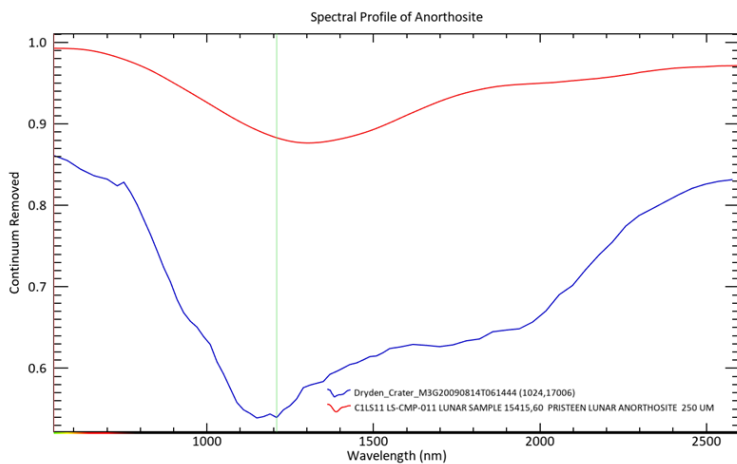


Фиг. 2 Ортопироксен (OPX)

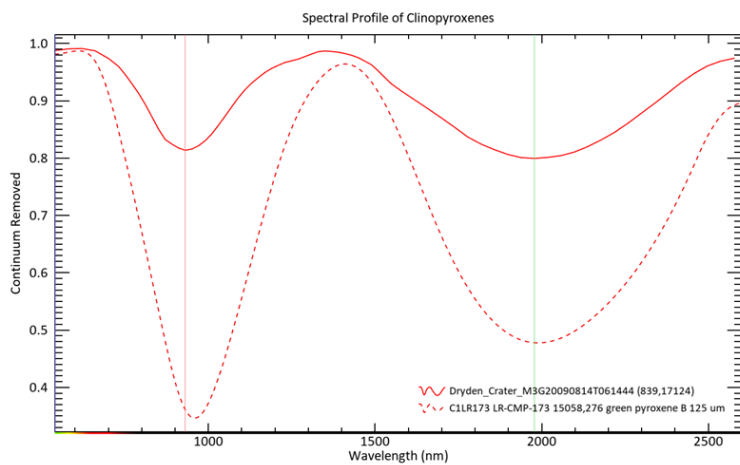


Фиг. 3 Плагиоклаз

Приложение 12 към глава 3. Спектрални криви извлечени от пиксели



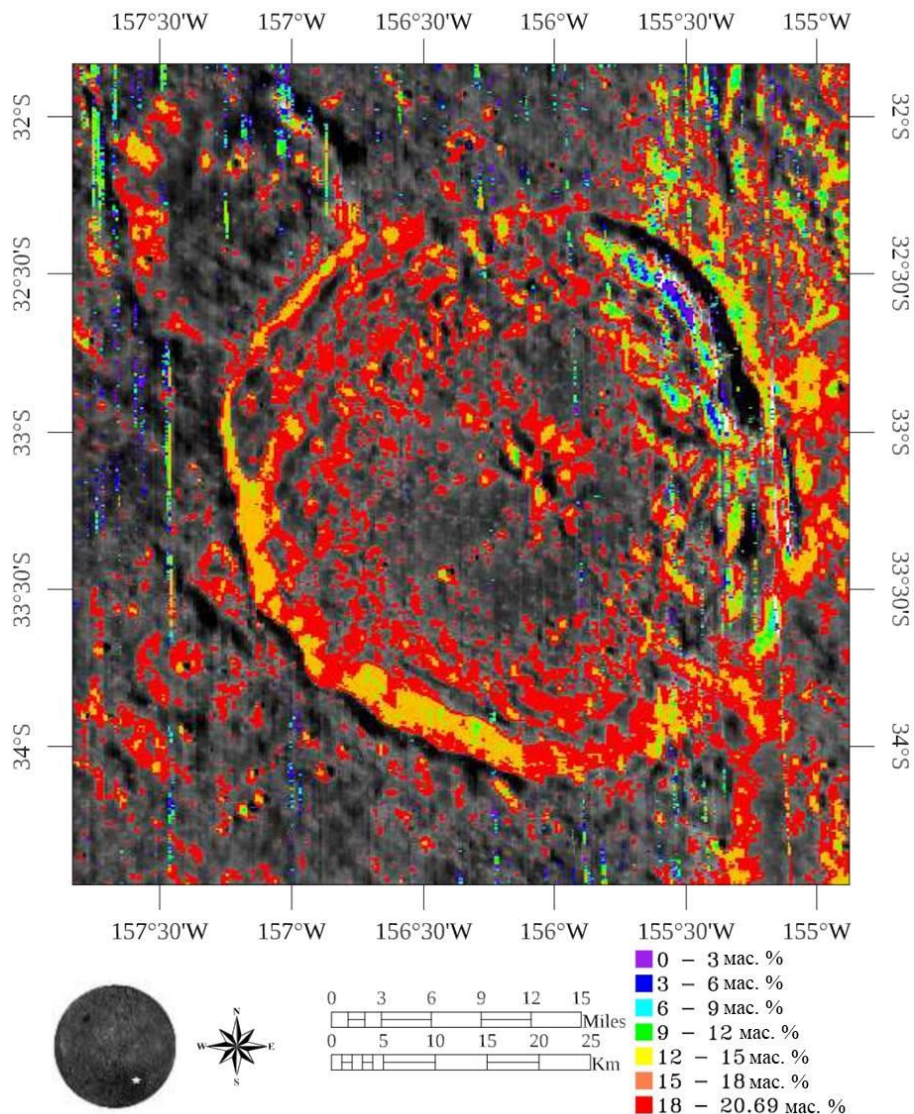
Фиг. 4 Анортозит (An)



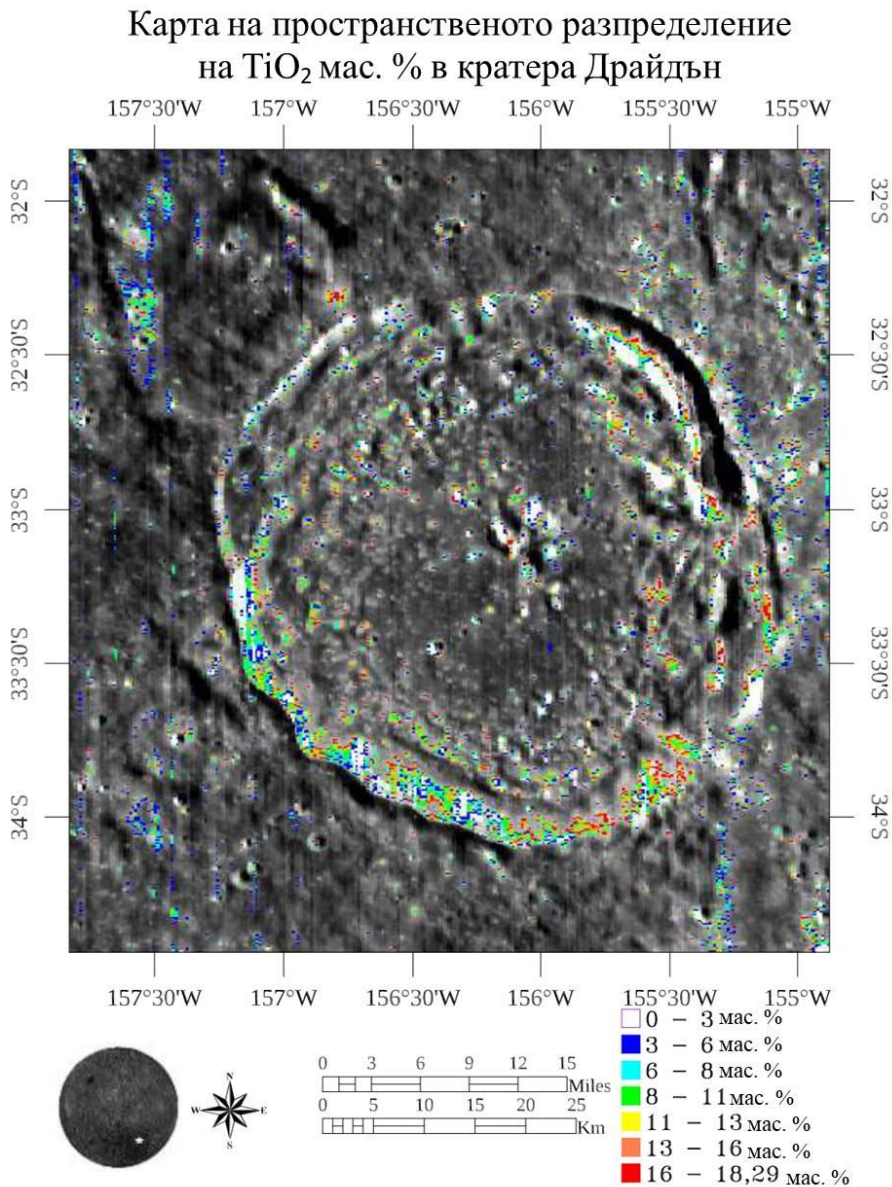
Фиг. 5 Клинопироксен (CPX)

Приложение 14 към глава 3. Карта на пространственото разпределение на FeO мас. % в кратера Драйдън

Карта на пространственото разпределение на FeO мас. % в кратера Драйдън

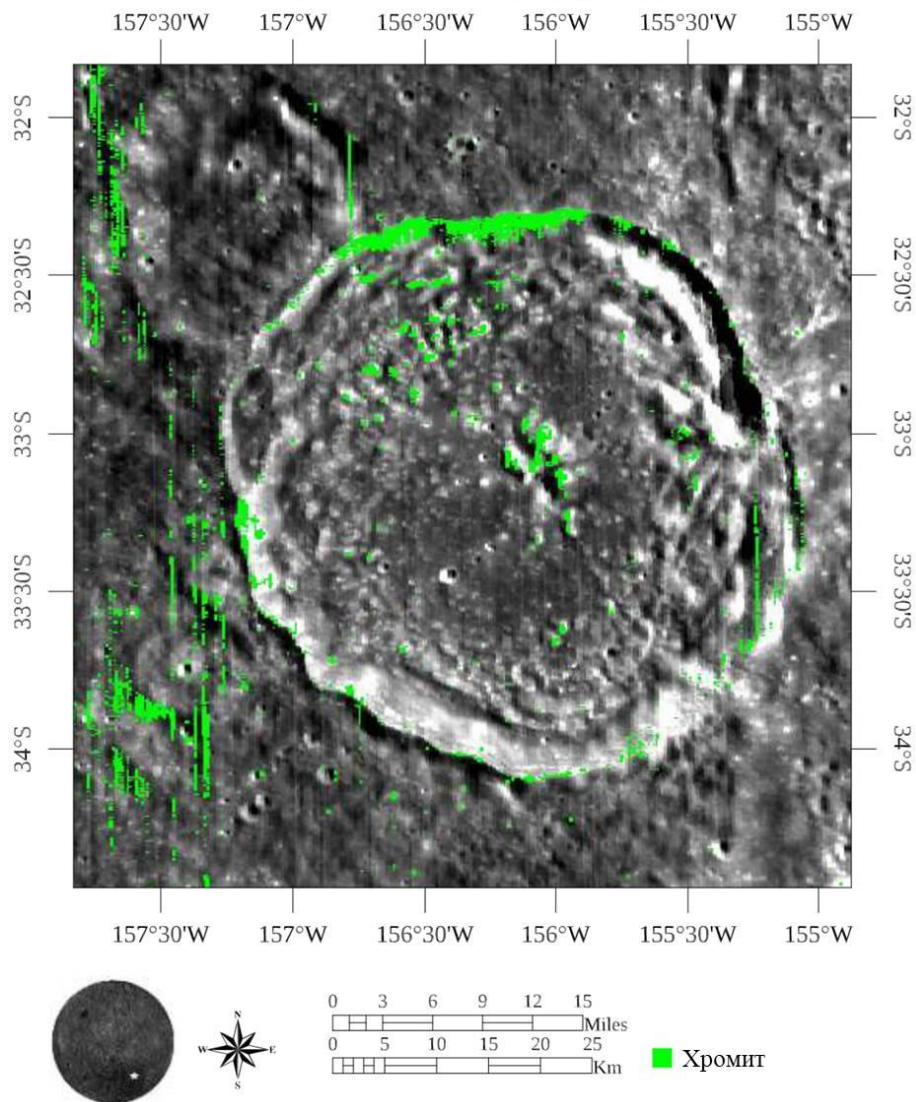


Приложение 16 към глава 3. Карта на пространственото разпределение на TiO_2 мас. % в кратера Драйдън



Приложение 18 към глава 3. Цветна карта на пространственото разпределение на хромит в кратера Драйдън

Цветна карта на пространственото разпределение на хромит в кратера Драйдън



VI. БЛАГОДАРНОСТИ

С дълбока признателност изразявам своите най-искрени благодарности към моя научен ръководител проф. д-р Лъчезар Филчев, който през целия изследователски процес прояви висок професионализъм, търпение и отдаденост. Неговото ръководство, ценни методически насоки и едновременно предоставената свобода на научно творчество ми позволиха да завърша този дисертационен труд.

С особена признателност изказвам благодарност към директора на Института за космически изследвания и технологии при Българската академия на науките проф. д-р инж. Георги Желев за оказаната подкрепа и съдействие при реализирането на настоящия дисертационен труд. Неговата ангажираност към развитието на научните изследвания и създаването на благоприятна среда за работа беше важен фактор за успешното изпълнение на поставените цели.

Изразявам своята искрена благодарност към чл.-кор. проф. д.б.н. Евдокия Пашева, директор на Центъра за обучение при Българската академия на науките, за съдействието и подкрепата при признаването на обучителните курсове Corinth Rift Laboratory (CRL) School 2023 и GMAP Planetary Geologic Mapping Winter School 2024 като част от моята докторантска подготовка. Нейната ангажираност към развитието на докторантите и създаването на възможности за усъвършенстване на професионалните компетенции в рамките на БАН допринесе значително за успешното реализиране на обучителната програма, свързана с дисертационния ми труд.

Сърдечно благодаря на доц. д-р Яна Цветанова от Института по минералогия и кристалография „Акад. Иван Костов“ при Българската академия на науките за оказаната експертна помощ и задълбочени консултации при редакцията на настоящия дисертационен труд. Нейните професионални препоръки относно терминологията, коректната употреба на геоложки и минераложки понятия, както и вниманието към детайлите, допринесоха съществено за повишаването на научното и редакционно качество на изследването.

Изразявам своята благодарност към проф. д-р инж. Деница Борисова и проф. д-р Христо Николов за тяхната конструктивна критика, която допринесе за по-задълбоченото развитие и усъвършенстване на дисертационния труд.

Сърдечно благодаря на проф. д.т.н. инж. Гаро Мардиросян, доц. д-р Пламен Тренчев и доц. д-р Мария Димитрова за техните ценни препоръки и насоки, както и на всички колеги от Института за космически изследвания и технологии при Българската академия на науките, които спомогнаха за подобряване на качеството и научната стойност на настоящия труд.

Изразявам своята искрена благодарност към Организационния комитет на Интердисциплинарния докторантски форум при Центъра за обучение на Българската академия на науките за предоставените възможности за участие и за отличната организация на събитията. Благодарение на техните усилия се осъществи форумът, който е ценна платформа за научен обмен, създаване на нови контакти и надграждане на знанията и уменията на докторанти от страната и чужбина.

Изказвам благодарност и към Huawei Technologies Bulgaria за предоставената подкрепа чрез двукратното ми отличаване като победител в стипендиантската програма Huawei Scholarship Program, което допринесе за успешното реализиране на настоящия дисертационен труд. Сърдечно благодаря и на г-жа Десислава Атанасова, PR мениджър на компанията, за оказаното съдействие и подкрепа в рамките на програмата.

Изразявам своята искрена благодарност към гл. ас. д-р Милен Чанев, който пръв ме запозна със сферата на дистанционните изследвания и представи науките за Земята като възможност за професионално и академично развитие.

С най-дълбока признателност изказвам благодарност на своите родители за тяхната безусловна любов, подкрепа и вяра в мен през всички етапи на моето личностно и професионално развитие. Тяхната отдаденост, търпение и морална опора са неизчерпаем източник на сили и вдъхновение, които ми помагат да преодолявам житейските и професионални предизвикателства.

С дълбока обич и признателност изказвам благодарност на своята дъщеря, която е мой непрестанен източник на вдъхновение и мотивация. Тя ми напомня за истинския смисъл на упоритостта, отдадеността и стремежа към постигане на целите.

Настоящият труд не би бил възможен без усилията, професионализма и отдадеността на всички учени, инженери и специалисти, участвали при регистрирането, обработката, архивирането

и предоставянето на използваните в дисертацията данни, към които изразявам своята признателност по-долу.

Acknowledgments:

I gratefully acknowledge the use of data from the Moon Mineralogy Mapper (M³), a NASA instrument aboard the Indian Space Research Organisation's (ISRO) Chandrayaan-1 spacecraft. M³ was developed at NASA's Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, in coordination with Brown University and was operated by the PDS Imaging Node.

The Chandrayaan-1 mission was managed by the Indian Space Research Organisation (ISRO).

Data were obtained from the NASA Planetary Data System Imaging Node, and the M³ Team is gratefully recognized for producing calibrated spectral image products for scientific use.

I gratefully acknowledge the LROC Team and Arizona State University for developing the Moon LRO LROC WAC Global Morphology Mosaic 100 m, and the USGS Astrogeology Science Center for publishing the dataset. I also thank NASA's Planetary Data System Cartography and Imaging Sciences Node for facilitating access to these products.

I gratefully acknowledge NASA's Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) Team and JAXA's SELENE (Kaguya) Terrain Camera (TC) Team for producing the Moon LRO LOLA – SELENE Kaguya TC DEM Merge 60N60S 59 m dataset (SLDEM2015). This product was made available through the USGS Astrogeology Science Center and the NASA Planetary Data System.

I also acknowledge the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) for operating the SELENE (Kaguya) mission and providing TC stereo data, and NASA Goddard Space Flight Center for acquiring and processing LOLA altimetric measurements.

This research utilizes spectra acquired by Carle M. Pieters and collaborators with the NASA Reflectance Experiment Laboratory (RELAB) facility at Brown University. The RELAB Spectral Library Bundle contains reflectance spectra and ancillary data obtained under NASA support and maintained by the Department of Earth, Environmental, and Planetary Sciences, Brown University. Data are provided by the NASA Planetary Data System (PDS).

ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

1. Anbazhagan, S., & Arivazhagan, S. (2010). Reflectance spectra of analog anorthosites: Implications for lunar highland mapping. *Planetary and Space Science*, 58(5), 752–760. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2009.12.002>
2. Barker, M. K., Mazarico, E., Neumann, G. A., Zuber, M. T., Haruyama, J., & Smith, D. E. (2016). A new lunar digital elevation model from the Lunar Orbiter Laser Altimeter and SELENE Terrain Camera. *Icarus*, 273, 346–355. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.07.039>
3. Borst, A., Foing, B., Davies, G., & van Westrenen, W. (2013). Surface mineralogy and stratigraphy of the lunar South Pole–Aitken Basin determined from Clementine UV/VIS and NIR data. *Planetary and Space Science*, 84, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2011.07.020>
4. Chavers, G., Suzuki, N., Smith, M., Watson-Morgan, L., Clarke, S. W., Engelund, W. C., ... & Jackson, S. (2019, October). *NASA's human lunar landing strategy*. International Astronautical Congress (No. MSFC-E-DAA-TN74775).
5. Cheek, L. C., & Pieters, C. M. (2014). Reflectance spectroscopy of plagioclase-dominated mineral mixtures: Implications for characterizing lunar anorthosites remotely. *American Mineralogist*, 99(10), 1871–1892. <https://doi.org/10.2138/am-2014-4785>
6. Christmann, P., Ayuk, E. T., Pedro, A. M. A., & Kumar, S. V. (2022). In *Routledge Handbook of the Extractive Industries and Sustainable Development* (p. 32). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003001317>
7. Cloutis, E. A., Sunshine, J. M., & Morris, R. V. (2004). Spectral reflectance-compositional properties of spinels and chromites: Implications for planetary remote sensing and geothermometry. *Meteoritics & Planetary Science*, 39(4), 545–565. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb00918.x>
8. Crawford, I. A. (2015). Lunar resources: A review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 39(2), 137–167. <https://doi.org/10.1177/0309133314567585>
9. Cudnik, B. (Ed.). (2023). *Encyclopedia of Lunar Science* (2nd ed.). Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14541-9>
10. Donaldson Hanna, K. L., Cheek, L. C., Pieters, C. M., Mustard, J. F., Greenhagen, B. T., Thomas, I. R., & Bowles, N. E. (2014). Global assessment of pure crystalline plagioclase across the Moon and implications for the evolution of the primary crust. *Journal of Geophysical*

11. Fisher, R., Hobgen, S., Mandaya, I., Riwu Kaho, N., & Zulkarnain. (2017). *Satellite image analysis and terrain modelling: A practical manual for natural resource management, disaster risk and development planning using free geospatial data and software* (Version 2, SAGA GIS 4). Charles Darwin University, Universitas Nusa Cendana & Universitas Halu Oleo. Достъпен на 30 януари 2025 г. на <http://sagatutorials.wordpress.com/>

12. Fortezzo, C. M., Spudis, P. D., & Harrel, S. L. (2020). *Release of the digital unified global geologic map of the Moon at 1:5,000,000 scale*. Paper presented at the 51st Lunar and Planetary Science Conference, Lunar and Planetary Institute, Houston, TX.

13. French, B. M. (1998). *Traces of catastrophe: A handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures* (No. LPI-Contrib-954). Lunar and Planetary Institute.

14. Fritz, J., Assis Fernandes, V., Greshake, A., Holzwarth, A., & Böttger, U. (2019). On the formation of diaplectic glass: Shock and thermal experiments with plagioclase of different chemical compositions. *Meteoritics & Planetary Science*, 54(7), 1533–1547. <https://doi.org/10.1111/maps.13289>

15. Grieve, R. A. F., Osinski, G. R., & Tornabene, L. L. (2014). *Planetary impacts. In Encyclopedia of the Solar System* (pp. 83–99). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415845-0.00004-9>

16. Hargitai, H., Wang, J., Stooke, P., Karachevtseva, I., Kereszturi, A., & Gede, M. (2017). Map projections in planetary cartography. In Hargitai, H. (Ed.), *Planetary Cartography and GIS* (pp. 185–220). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51835-0_7

17. Hawke, B. R., Peterson, C. A., Blewett, D. T., Bussey, D. B. J., Lucey, P. G., Taylor, G. J., & Spudis, P. D. (2003). Distribution and modes of occurrence of lunar anorthosite. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 108(E6). <https://doi.org/10.1029/2002JE001890>

18. Hoshino, T., Wakabayashi, S., Ohtake, M., Karouji, Y., Hayashi, T., Morimoto, H., Shiraishi, H., Shimada, T., Hashimoto, T., Inoue, H., Hirasawa, R., Shirasawa, Y., Mizuno, H., & Kanamori, H. (2020). Lunar polar exploration mission for water prospection – JAXA's current status of joint study with ISRO. *Acta Astronautica*, 176, 290–297. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.05.054>

19. Isaacson, P. J., Pieters, C. M., Besse, S., Clark, R. N., Head, J. W., Klima, R. L., ... & Tompkins, S. (2011). Remote compositional analysis of lunar olivine-rich lithologies with Moon Mineralogy Mapper (M3)

spectra. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 116(E6). <https://doi.org/10.1029/2010JE003731>

20. Ivanov, M. A., Hiesinger, H., van der Bogert, C. H., Orgel, C., Pasckert, J. H., & Head, J. W. (2018). Geologic history of the northern portion of the South Pole–Aitken basin on the Moon. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 123(8), 1901–1925. <https://doi.org/10.1029/2018JE005590>

21. Jones, H. (2018, July). *The recent large reduction in space launch cost*. Paper presented at the 48th International Conference on Environmental Systems, NASA Ames Research Center.

22. Kenkmann, T., Collins, G., & Wünnemann, K. (2012). The modification stage of crater formation. In G. R. Osinski & E. Pierazzo (Eds.), *Impact Cratering: Processes and Products* (pp. 121–138). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118447307.ch5>

23. Kenkmann, T., Poelchau, M., & Wulf, G. (2014). Structural geology of impact craters. *Journal of Structural Geology*, 62, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.01.015>

24. Klima, R. L., Dyar, M. D., & Pieters, C. M. (2011). Near-infrared spectra of clinopyroxenes: Effects of calcium content and crystal structure. *Meteoritics & Planetary Science*, 46(3), 379–395. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2010.01158.x>

25. Kring, D. A. (2023). *Astronaut Training for Operations in Impact-Cratered Terrains (LPI Contribution No. 3001)*. Lunar and Planetary Institute. https://www.lpi.usra.edu/publications/books/astronaut_training_impactcrater/s/

26. Lawrence, D. J., Feldman, W. C., Elphic, R. C., Little, R. C., Prettyman, T. H., Maurice, S., ... & Binder, A. B. (2002). Iron abundances on the lunar surface as measured by the Lunar Prospector gamma-ray and neutron spectrometers. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 107(E12), 13-1. <https://doi.org/10.1029/2001JE001530>

27. Li, C., Liu, J., Wang, Q., Wang, C., Zou, Y., Zhang, H., ... & Ouyang, Z. (2019). China's present and future lunar exploration program. *Science*, 365(6452), 238–239. <https://doi.org/10.1126/science.aax9908>

28. Li, K., Wang, J., & Shi, Y. (2023). A review of studies on mass-movements on the Moon. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 10, 1223642. <https://doi.org/10.3389/fspas.2023.1223642>

29. Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation* (7th ed.). Wiley.

30. Lindbergh, R. (2024, July 29). Space resource extraction: Overview and issues for Congress (CRS Report No. R48144). Congressional Research Service. <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R48144>
31. Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2021). *Geographic Information Science and Systems* (5th ed.). Wiley.
32. Losiak, A., Wilhelms, D., Byrne, C., Thaisen, K., Weider, S., Kohout, T., O'Sullivan, K., & Kring, D. A. (2009). *A new lunar impact crater database*. Paper presented at the 40th Lunar and Planetary Science Conference, Abstract #1533.
33. Lucey, P. G., Blewett, D. T., & Hawke, B. R. (1998). Mapping the FeO and TiO₂ content of the lunar surface with multispectral imagery. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 103(E2), 3679–3699. <https://doi.org/10.1029/97JE03019>
34. Lucey, P. G., Blewett, D. T., & Jolliff, B. L. (2000). Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet-visible images. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105(E8), 20297–20305. <https://doi.org/10.1029/1999JE001117>
35. Lucey, P. G., Taylor, G. J., Hawke, B. R., & Spudis, P. D. (1998). FeO and TiO₂ concentrations in the South Pole-Aitken basin: Implications for mantle composition and basin formation. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 103(E2), 3701–3708. <https://doi.org/10.1029/97JE03146>
36. Melosh, H. J., Kendall, J., Horgan, B., Johnson, B. C., Bowling, T., Lucey, P. G., & Taylor, G. J. (2017). South Pole–Aitken basin ejecta reveal the Moon's upper mantle. *Geology*, 45(12), 1063–1066. <https://doi.org/10.1130/G39375.1>
37. Moriarty, D. P. III, Simon, S. B., Shearer, C. K., Haggerty, S. E., Petro, N., & Li, S. (2023). Orbital characterization of the composition and distribution of spinels across the Crisium region: Insight from Luna 20 samples. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 128, e2022JE007482. <https://doi.org/10.1029/2022JE007482>
38. Moriarty, D. P., & Pieters, C. M. (2016). Complexities in pyroxene compositions derived from absorption band centers: Examples from Apollo samples, HED meteorites, synthetic pure pyroxenes, and remote sensing data. *Meteoritics & Planetary Science*, 51(2), 207–234. <https://doi.org/10.1111/maps.12588>
39. Moriarty, D. P., & Pieters, C. M. (2018). The character of South Pole-Aitken Basin: Patterns of surface and subsurface composition. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 123(4), 729–747. <https://doi.org/10.1002/2017JE005364>

40. O'Brien, P., & Byrne, S. (2022). Degradation of the lunar surface by small impacts. *The Planetary Science Journal*, 3(10), 235. <https://doi.org/10.3847/PSJ/ac9130>
41. Orgel, C., Torres, I., Besse, S., van der Bogert, C., Bahia, R., Prissang, R., Ivanov, M., Hiesinger, H., Michael, G., Pasckert, J., El Yazidi, M., Bradák, B., & Walter, S. (2024). Characterization of high-priority landing sites for robotic exploration missions in the Apollo Basin, Moon. *The Planetary Science Journal*, 5, 29. <https://doi.org/10.3847/PSJ/ad1108>
42. Osinski, G. R., Melosh, H. J., Andrews-Hanna, J., Baker, D., Denevi, B., Dhingra, D., & Zellner, N. (2023). Lunar impact features and processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 89(1), 339–371. <https://doi.org/10.2138/rmg.2023.89.08>
43. Papike, J. J., Simon, S. B., & Laul, J. C. (1982). The lunar regolith: Chemistry, mineralogy, and petrology. *Reviews of Geophysics*, 20(4), 761–826. <https://doi.org/10.1029/RG020i004p00761>
44. Penasa, L. (2022). *Mappy plugin for QGIS*. QGIS Plugin Repository. Достъпен на 20 февруари 2024 г. на <https://plugins.qgis.org/plugins/mappy>
45. Pieters, C. M., Boardman, J., Buratti, B., Chatterjee, A., Clark, R., Glavich, T., Green, R., Head, J., Isaacson, P., Klima, R., Kramer, G., Lundeen, S., Malaret, E., McCord, T., Mustard, J., Nettles, J., Petro, N., Runyon, C., Staid, M., Sunshine, J., Taylor, L., Tompkins, S., & Varanasi, P. (2009). The Moon Mineralogy Mapper (M³) on Chandrayaan-1. *Current Science*, 96(4), 500–505.
46. Pieters, C. M., Hanna, K. D., Cheek, L., Dhingra, D., Prissel, T., & Jackson, C. (2014). The distribution of Mg-spinel across the Moon and constraints on crustal origin. *American Mineralogist*, 99, 1893–1910. <https://doi.org/10.2138/am-2014-4776>
47. Pieters, C. M., Head III, J. W., Gaddis, L., Jolliff, B., & Duke, M. (2001). Rock types of South Pole-Aitken basin and extent of basaltic volcanism. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106(E11), 28001–28022. <https://doi.org/10.1029/2000JE001414>
48. Pieters, C. M., Taylor, L. A., Noble, S. K., Keller, L. P., Hapke, B., & Morris, R. V. (2000). Space weathering on airless bodies: Resolving a mystery with lunar samples. *Meteoritics & Planetary Science*, 35(5), 1101–1107. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2000.tb01496.x>
49. Pieters, C., & Hiroi, T. (2004). RELAB (Reflectance Experiment Laboratory): A NASA multiuser spectroscopy facility.
50. Rambaux, N., Fienga, A., & Kaitheri, A. (2023). Lunar reference systems framework. In *Journées 2023: Temps et Relativité Générale*. Paris Observatory. ISBN 978-2-901057-74-1

51. Shkuratov, Y., Kaydash, V., Korokhin, V., Velikodsky, Y., Opanasenko, N., & Videen, G. (2011). Optical measurements of the Moon as a tool to study its surface. *Planetary and Space Science*, 59(13), 1326–1371. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2011.06.011>
52. Smith, M., Craig, D., Herrmann, N., Mahoney, E., Krezel, J., McIntyre, N., & Goodliff, K. (2020, March). *The Artemis program: An overview of NASA's activities to return humans to the Moon*. In 2020 IEEE Aerospace Conference (pp. 1–10). IEEE. <https://doi.org/10.1109/aero47225.2020.9172323>
53. Snyder, J. P. (1987). Map projections--A working manual (Vol. 1395). US Government Printing Office.
54. Speyerer, E. J., Robinson, M. S., Denevi, B. W., et al. (2018). *Global morphology mosaic from the LROC WAC* [Data set]. LROC Science Operations Center, Arizona State University
55. Suárez-Valencia, J. E., Rossi, A. P., Zambon, F., Carli, C., & Nodjoumi, G. (2024). MoonIndex, an open-source tool to generate spectral indexes for the Moon from M3 data. *Earth and Space Science*, 11, e2023EA003464. <https://doi.org/10.1029/2023EA003464>
56. Sundararajan, V. (2012). *Indian Lunar Space Exploration Program – Chandrayaan I and II Missions*. AIAA SPACE 2012 Conference & Exposition. <https://doi.org/10.2514/6.2012-5324>
57. Sunshine, J. M., Pieters, C. M., & Pratt, S. F. (1990). Deconvolution of mineral absorption bands: An improved approach. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B5), 6955–6966. <https://doi.org/10.1029/JB095iB05p06955>
58. Tobler, W. (1987). Measuring spatial resolution. In *Proceedings of the Land Resources Information Systems Conference* (pp. 12–16).
59. Turtle, E., Pierazzo, E., Collins, G., Osinski, G., Melosh, J., Morgan, J., Reimold, W., & Spray, J. (2004). Impact structures: What does crater diameter mean? *Special Paper of the Geological Society of America*, 384, 1–24. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2384-1.1>
60. Wang, Z., Wu, Y., Blewett, D. T., Cloutis, E. A., Zheng, Y., & Chen, J. (2017). Submicroscopic metallic iron in lunar soils estimated from the in situ spectra of the Chang'e-3 mission. *Geophysical Research Letters*, 44(8), 3485–3492. <https://doi.org/10.1002/2017gl072652>
61. Warren, P. H. (1985). The magma ocean concept and lunar evolution. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 13, 201–240. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.13.050185.001221>
62. Wei, Z., Li, C., Xiong, Y., Zhang, Z., Zeng, X., & Liu, Y. (2021). China's Lunar and Planetary Data System: Preserve and present

reliable Chang'e Project and Tianwen-1 scientific data sets. *Space Science Reviews*, 217(8), 88. <https://doi.org/10.1007/s11214-021-00862-3>

63. Wilhelms, D. E., MacCauley, J. F., Lucchitta, B. K., El-Baz, F., Stuart-Alexander, D. E., Scott, D. H., & West, M. N. (2013). *Lunar 1:5M geologic map renovation*. 44th Lunar and Planetary Science Conference, Abstract #2114. USGS Astrogeology Science Center.

64. Wilhelms, D. E., McCauley, J. F., & Trask, N. J. (1987). *The geologic history of the Moon* (U.S. Geological Survey Professional Paper 1348). U.S. Government Printing Office. <https://doi.org/10.3133/pp1348>

65. Williams, K. B., Jackson, C. R. M., Cheek, L. C., Donaldson Hanna, K. L., Parman, S. W., & Pieters, C. M. (2016). Reflectance spectroscopy of chromium-bearing spinel with application to recent orbital data from the Moon. *American Mineralogist*, 101(4), 726–734. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5535>

66. Wood, J. A., Dickey, J. S., & Marvin, U. B. (1970). Lunar anorthosites and a geophysical model of the Moon. *Science*, 167(3918), 602–604. <https://doi.org/10.1126/science.167.3918.602>

67. Wu, Y., Xue, B., Zhao, B., Lucey, P., Chen, J., Xu, X., & Ouyang, Z. (2012). Global estimates of lunar iron and titanium contents from the Chang'E-1 IIM data. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 117(E2). <https://doi.org/10.1029/2011JE003879>

68. Xing, Y., & Gomez, R. (2001). Hyperspectral image analysis using ENVI (environment for visualizing images). *Proceedings of SPIE*, 4381, 446–453. <https://doi.org/10.1117/12.428244>

69. Zhang, X., & Cloutis, E. (2021). Near-infrared spectra of lunar ferrous mineral mixtures. *Earth and Space Science*, 8(4), e2020EA001153. <https://doi.org/10.1029/2020EA001153>

70. ACTGate. (2023). *About ACTGate Platform*. Достъпен на 21 април 2025 г. на <https://www.actgate.com/about>

71. ArcGIS Developers. (2024). *Geographic Coordinate System Moon 2000*. Достъпен на 17 април 2025 г. на <https://developers.arcgis.com/javascript/3/jshelp/gcs.html>

72. BAS (2025). ИКИТ-БАН подписа Меморандум за сътрудничество с китайския Deep Space Exploration Laboratory (DSEL). Българска академия на науките. <https://www.bas.bg/?p=56257>

73. Embassy of the Republic of Bulgaria. (2023). *България се присъедини към Споразуменията „Артемиди“*

74. European Commission. (2019). *Europlanet 2024 Research Infrastructure (EPN-2024-RI) (Grant Agreement No. 871149)*. Horizon 2020 Framework Programme. <https://doi.org/10.3030/871149>

75. European Space Agency. (2019). *ESA strategy for science at the Moon*. https://sci.esa.int/documents/34161/35992/1567260389633-ESA_Strategy_for_Science_at_the_Moon.pdf
76. European Space Agency. (2024). *ESA Report on the Space Economy 2024*. ESA Space Economy. <https://space-economy.esa.int/documents/b61btvmeaf6Tz2osXPu712bL0dwO3uqdOrFAwNTQ.pdf>
77. European Space Agency. (n.d.). *In-Situ Resource Utilisation (ISRU) Demonstration Mission*. ESA. Достъпен на 10 май 2024 г. на <https://exploration.esa.int/web/moon/-/60127-in-situ-resource-utilisation-demonstration-mission>
78. Europlanet Society. (2023). *Europlanet 2024 RI: A collaborative European research infrastructure for planetary science*. Достъпен на 20 май 2025 г. на <https://www.europlanet.org/europlanet-2024-ri/>
79. IEA. (2024). *Global critical minerals outlook 2024*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024>
80. International Space Exploration Coordination Group – ISECG. (2021). *Annual Report 2021 of the International Space Exploration Coordination Group*. <https://www.globalspaceexploration.org>
81. LROC QuickMap. (2023). *Lunar Reconnaissance Orbiter Camera QuickMap Tool*. Достъпен на 20 април 2025 г. на <https://quickmap.lroc.asu.edu>
82. NASA. (2020). *NASA's Lunar Exploration Program Overview*. National Aeronautics and Space Administration. https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/artemis_plan-20200921.pdf
83. NV5 Geospatial Solutions, Inc. (2024). *Documentation Center*. NV5 Достъпен на 11 ноември 2025 г. на <https://www.nv5geospatialsoftware.com/docs/home.html>
84. Organisation for Economic Co-operation and Development. (2022). *OECD handbook on measuring the space economy* (2nd ed.). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/8bfef437-en>
85. QGIS. (2023). *Official QGIS Documentation*. Достъпен на 18 април 2025 г. на <https://docs.qgis.org/3.34/en/docs/index.html>
86. Research Systems, Inc. (2003). *ENVI User's Guide*.
87. United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2024). *World population prospects 2024: Summary of results* (UN DESA/POP/2024/TR/NO. 9). United Nations. <https://www.un.org/development/desa/pd/>