

ДИСТАНЦИОННИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА ПОЛЕЗНИ ИЗКОПАЕМИ НА ЛУНАТА

Искрен Иванов, Лъчезар Филчев

*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: iso.ivanov@space.bas.bg*

Ключови думи: Луна, лунен реголит, спектроскоп, химичен състав, минерали

Резюме: Докладът представя обзор на лунни мисии и апарати развили се успешно и изпълнили поставената им цел, дистанционно да изследват естествения спътник на планетата Земя. Обхванатите мисии и апарати са изложени хронологично, като основен критерии по който са подбрани е извършените изследвания да са проведени дистанционно, оборудвани с апарати за провеждане на дистанционни изследвания насочени към изучаване на лунната повърхност и геология. Изследванията проведени с тях са насочени към разкриване състава на материала покриващ Луната (реголит) и неговия химичен състав.

REMOTE SENSING OF THE MOON'S MINERALS

Iskren Ivanov, Lachezar Filchev

*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: iso.ivanov@space.bas.bg*

Keywords: Moon, moon regolith, spectroscopy, chemical compound, minerals

Abstract: The following report presents an overview of lunar missions and instruments that have been successfully developed and fulfilled their goal, of remotely exploring the satellite of the planet Earth – the Moon. The covered missions and instruments are presented chronologically. The main selection criteria for the studies are to be carried out remotely, equipped with devices for performing remote sensing aimed at studying the lunar surface and geology. The reported research aimed at revealing the composition of the material covering the Moon (regolith) and its corresponding chemical composition.

Въведение

Присъствието на единствения естествен спътник на Земята е забележимо и с просто око както на нощното небе така и през някои дни. Изследването на Луната посредством инструменти спомагачи и усилвачи човешките сетива става възможно след откриването на телескопа и Галилео Галилей използва функциите му за да наблюдава Луната и нейната забележителна повърхност. В настоящия доклад са представени част от мисиите и апаратите изпратени до луната за събиране на данни посредством дистанционно изследване на нейните характеристики. Луната е била обект на изследване, такъв е в настоящето и ще продължава да поражда интерес и да бъде изследвана и за в бъдеще. Дистанционните изследвания на Луната се извършват благодарение на измервания на нейните характеристики посредством специални инструменти регистриращи постъпващите потоци електромагнитна енергия и се изразява в изводите направени вследствие обработка и анализ на регистрираните данни. Извършва се регистриране на постъпващата информация за енергетичните и поляризационните характеристики на собственото и отразеното от Луната излъчване в различните области на електромагнитния спектър. Изследват се основните явления, образувания и ресурси на Луната, както и редица нейни параметри [1]. В дистанционните изследвания на Луната се ползват космически апарати оборудвани с различни инструменти. Според целите на изследванията се ползват спектрометри, инструменти опериращи в различни диапазони на електромагнитния спектър. За определяне на химическия състав се прилагат гама спектрометри и рентгенови спектрометри. За установяване

на минералния състав се ползват многоканални спектрометри работещи в ултравиолетовия, видимия и инфрачервения диапазон на електромагнитния спектър. За установяване на геологията и топографията се използват радари, лазерни висотомери и стерео камери с висока разделителна способност. Ключови характеристики на инструментите, определящи качеството и ефективността на изследването, са пространствената, спектралната, радиометричната и времевата им разделителна способност. От голяма важност за точността на изследванията е степента на влияние на заобикалящата ги среда, магнитните полета на Луната и Земята, слънчевия вятър и др.

Мисиите Луна и Зонд

В съвременната епоха интересът към естествения спътник на планетата Земя започва с развитието на космическото дело в Съветския съюз. Луната е обект на изследване от страна на десетки съветски проекти обединени в две основни програми. Едната има за цел облитане на Луната, а другата да се осъществи кацане на лунната повърхност. Облитане е постигнато с космическия апарат Луна-3, който за пръв път в човешката история заснема далечната страна на Луната [2]. Начинанието е продължено чрез космическия апарат Зонд-3 изстрелян на 18 юли 1965 г. Той е оборудван с камера чийто обектив е с фокусно разстояние 106,4 mm и относителна апертура 1:8 с автоматично обработване на филми и оптико-механично сканиращо устройство за предаване на изображенията, с инструменти за измерване на радиация, магнитно поле и ултравиолетов спектрограф. Заснемането е от 11 570 km до 9 220 km разстояние от лунната повърхност. Заснети са общо 28 кадъра, като експонирани с ултравиолетов спектрограф са 3 от тях. Направено е заснемане на западната част на далечната страна на Луната, представляваща около една трета от повърхността невидима от Земята. Всеки кадър е предаден с разлагането му на 1 100 реда с яснота от 860 елемента. Освен изображенията са получени повърхностните спектри на Луната в ултравиолетовия (1900–2700 Å) и инфрачервения (3–4 μm) спектри. Въз основа на данните от космическия кораб Зонд-3, е съставена схематична карта на западния сектор на далечната страна на Луната, съставена от Държавния астрономически институт „Щернберг“ и Централния изследователски институт по геодезия, въздушно проучване и картография.

На 31 май 1966 г. е изстрелян космическият апарат Луна-10, който става първият изкуствен спътник на Луната наред с първото ѝ гама-изследване. За период от 56 дни апаратът прави 460 обиколки около нея. Инструменталното му оборудване включва:

1. Трикомпонентен магнитометър с чувствителност 15 пъти по-висока от тази на Луна-2.
2. Сцинтилационен гама-спектрометър за изследване на гама-излъчване от Луната.
3. Броячи на меки рентгенови фотони за измерване на рентгенова флуоресцентна радиация на лунни скали.
4. Броячи за запис на слънчева радиация и космически лъчи, както и за откриване на йоносферата на Луната.
5. Йонни уловители за запис на поток от йони и електрони на слънчевия вятър.
6. Пиезоелектрични сензори с площ около 1 m² за регистриране на метеорни частици с маса над 10⁻⁸ g.
7. Инфрачервен сензор за определяне на интегралното топлинно излъчване на Луната.

Установено е, че 90% от лунната радиация се причинява от ядрени реакции под въздействието на космически лъчи и само 10% от естествената радиация на K, U и Th в лунните скали. Установено е, че вариациите на γ-радиацията, дължащи се на естествената радиоактивност на лунните скали в различни региони, не надвишават 40%. Установено е, че съдържанието на естествени радиоактивни елементи в лунните скали в така наречените лунни морета съответства на земните базалти, а в лунните планини на земните основни скали, изяснени са масата и формата на Луната.

На 22 октомври 1966 г. е изведен в орбита космическия апарат Луна-12. Той продължава заснемането и геохимичното картографиране на лунната повърхност.

От разстояние 100–340 km са заснети Oceanus Procellarum, Mare Imbrium, кратера Aristarchus. Луна-12 в допълнение към инструментите на Луна-10 е оборудвана още и със спектро-фотометър УС-3, радиоастрономическа апаратура “Касиопея 4” за наблюдение на дълго-вълново космическо радиоизлъчване и телевизионни камери с фокусно разстояние съответно 500 mm и 110 mm. Разполага с 41 кадъра предназначени за една снимачна сесия с продължителност 64 min с размер на изображенията 1 100 на 1 100 елемента. Луна-12 изследва

гама и рентгеновото лъчение на неизследвани региони на Луната. Потвърдено е съдържанието на K, U и Th в скали на лунните морета, регистрирано преди това от космическия апарат Луна-10. Установена е повишена концентрация на малки вторични ударни кратери в района на кратера Aristarchus.

Мисиите Аполо

Интерес към Луната имат и САЩ, които развиват своята лунна програма Аполо в периода 1969 – 1972 г. В резултат на програмата са събрани огромно количество данни под формата на фотографии и резултати от експерименти. Дистанционните изследвания на Луната на програмата Аполо са в допълнение на *in situ* експериментите проведени на лунната повърхност. Те са поредица от дистанционни изследвания на борда на модула с научно оборудване (SIM) добавен към мисиите Аполо 15 и Аполо 16 намиращ се на орбиталния команден и сервизен модул (CSM) на по-късните мисии от клас – J [3].

На 26 юли 1971 г. Аполо 15 е изстрелян. Орбиталния инструментален набор е образец, с който са оборудвани и мисиите Аполо 16 и Аполо 17. Инструменталният набор включва:

1. Метрични и панорамни камери осигуряващи систематично заснемане на лунната повърхност.
2. Лазерен висотомер измерващ височинните характеристиките на лунната повърхност.
3. Експеримент с S-канален транспондер измерващ регионалните вариации в гравитационното ускорение на Луната.
4. Експеримент с рентгенов флуоресцентен спектрометър измерващ състава на лунната повърхност.
5. Експеримент с гама-лъчев спектрометър измерващ състава на лунната повърхност.
6. Експеримент със спектрометър на алфа частици измерващ излъчването на радон от лунната повърхност.
7. Експеримент с орбитален масспектрометър измерващ състава на лунната атмосфера.
8. Експеримент с двойночестотен радар измерващ разсейването на радарните вълни от лунната повърхност.
9. Субсателит измерващ регионалните вариации в гравитационното ускорение и магнитното поле на Луната и разпределението на заредените частици около Луната.

Лунният реголит

Луната е покрита от сух, прашен и скалист материал, наречен реголит. Този термин се употребява за назоваване на механично произведените слоеве покриващи планетарните повърхности. Реголитът представлява фрагментирани, неконсолидирани скални материали, резултат от въздействието на астероиди, комети и метеорити върху лунната повърхност в продължение на повече от 4 милиарда години. Цялата лунна повърхност се състои от слой реголит, с различна дебелина основно от 2 m до 20 m с изключение на някои много стръмни стени на кратери и канали от лава, където основната скала може да бъде открита [4]. Съставът му е смесен включващ локален материал, според района с допълнение от скални фрагменти добавени в следствие на освободена маса от удари на астероиди и др. космически тела в лунната повърхност. Реголитът представлява богата и разнообразна смес от скални и минерални фрагменти, извлечени от скалите и стъклени частици, образувани при ударите. В по-голямата си част реголитът е съставен от аглутинати, частиците от минерални фрагменти свързани от стъклото полученото при ударите. Химическият състав на реголита отразява състава на основните скали. Реголитът в планините е богат на Al, както и високопланинските скали. Реголитът в моретата е богат на Fe и Mg, основни съставни компоненти на базалта.

Частиците съставляващи реголита са голям процент малки частици, като ~20% са по-малки от 0,02 mm [5]. Смесването на елементите не достатъчно, за да замъгли спектралните различия между планините и моретата.

Под слоя реголит на Луната се намира скалист слой с дебелина варираща от 60 km в регионите намиращи се от близката страна на Луна до 150 km на далечната страна.

В следствие на множеството проучвания на лунната повърхност и нейния състав е установено, че геологията на Луната според основната минералогия е три типа. Feldspathic Highlands Terrane (FHT) високопланинска кора от анортозит. Procellarum KREEP Terrane (PKT) базалти с високо съдържание на калий (K), редкоземни елементи (REE), фосфор (P) и Mare Basalts (MB) [4]. Чрез дистанционните методи са изследвани най-горните геологични слоеве на

Луната. Материалът на лунната повърхност в районите на моретата е основно оливин с мафичен произход, съдържащ предимно Fe, Mg, Ti и минерали с висока плътност, образувани от силикати. Тъмния цвят на моретата се дължи на слабата отражателна способност на Fe. Скалите образувачи FHT са основно анортозит, скалообразуващ минерал от група фелдшпати (плагиоклаз), магмени скали богати на Ca, Al и силикати. Те са по-леки и с по-малка плътност, което води до тяхното изплуване в лавата. Данните, събрани от спектрометрите за изображения на борда на мисиите Chandrayaan-1 и Kaguya, потвърждават съществуването на огромни експозиции на кристален фелдшпат в лунните планини [6] състоящ се главно от анортозит, анортозитно габро и анортозитен норит, характеризиращи се с различни пропорции на плагиоклазен фелдшпат и различни видове Mg минерали.

Мисиите Аполо и Луна връщат проби от лунната повърхност. Направени са им геохимични и минераложки анализи благодарение на които става възможно съпоставянето им с регистрирани спектрални данни. В следващите години изследването на Луната е във своеобразен застои от гледна точка на активни мисии и изстрелвани апарати.

Clementine

На 25 януари 1994 г. е изстрелян космическият апарат Clementine, който в продължение на 10 седмици обикаля около Луната и изпраща 330 GB научни данни [7]. Clementine е сателит с тегло 140 kg с цел докато събира ценна научна информация да представи демонстрира способностите на новите технологии в космоса и по-конкретно възможностите на инструменталното му оборудване по отношение приложението му на военни разузнавателни сателити [8]. Инструменталният набор включва:

1. Ултравioletова видима (UVVIS) камера с тегло (0,4 kg) и размер на пиксела на CCD матрицата от 23 x 26 μm с диапазон (400–950 nm)
2. Инфрачервена (NIR) камера с тегло (1,9 kg) с диапазон (1 100–2 780 nm)
3. LIDAR с тегло (1,1 kg) с диапазон (1 064–532 nm)
4. Инфрачервената камера (LWIR) (2,1 kg)
5. Камера с висока разделителна способност (HIRES) (1,12 kg) с диапазон (400–800 nm)
6. Телескоп за заредени частици (CPT) измерващ потока заредени частици и протони.

Тези инструменти правят първите глобални цифрови много-спектрални измервания на Луната, наред с първия почти глобален топографски модел. UVVIS камерата прави 8,3 km отсечки от 8–9 микронни температурни измервания, вложени във всяка 44 km широка UVVIS картографска орбита, покриваща приблизително 20% от Луната. За обекти представляващи особен интерес Clementine заснема много-спектрални изображения с разделителна способност (25–50 m/пиксел) във видимия спектър и с разделителна способност (60 m/пиксел) в инфрачервения спектър. Събраните панхроматични данни са с пълно покритие на лунните полярните региони. Параметрите на заснемане ~100–500 m/пиксел правят възможно прякото свързване на данните от спектралните апарати и направените геохимични и минераложки анализи на пробите взети от мисиите Аполо и Луна. Вследствие на тяхното съпоставяне е установено, че пробите донесени от мисиите Аполо далеч не представят цялото многообразие на лунната повърхност. Съставена е първата цялостна цифрова много-спектрална карта на Луната и първата цялостна топографска карта. Clementine поставя началото на нова парадигма в планирането, подготовката и провеждането на следващите лунни мисии на САЩ.

Lunar Prospector

На 6 януари 1998 г. е изстрелян космическият орбитален апарат на НАСА, Lunar Prospector, който е в лунна орбита в продължение на една година на надморска височина от 100 km. Впоследствие височината на орбитата бива снижена на два пъти до 30 km и 10 km. Преднамерено сателитът на 31 юли 1999 г. е снижен достатъчно, за да се осъществи сблъсък с лунната повърхност в кратер намиращ се в региона на южния полюс.

Lunar Prospector е оборудван с пет инструмента разположени върху на три радиални стрели. Инструменталният набор включва: спектрометър за гама лъчи, неутронен спектрометър, магнитометър, електронен рефлектометър, спектрометър за алфа частици, който е повреден при изстрелването. Движението на Lunar Prospector също се проследява с цел да предоставя данни за лунната гравитация. След обработката и анализа на данните от гама спектрометъра на Lunar Prospector в глобален мащаб са определени основните химически елементи в състава на

лунната повърхност (O, Mg, Al, Si, Ca, Ti и Fe) и радиоактивните елементи (K, Th и U). От получените данни е установено, че северозападната близка страна на Луната около Mare Imbrium е необичайна по състав с повишено съдържание на Th. Този регион е наречен Procellarum KREEP Terrane (PKT). Терминът KREEP се използва за описание на обогатените с калий (K), редкоземни елементи (REE) и фосфор (P) скали [3] концентрирани в периферните зони на Mare Imbrium, близките морета и планини, както и в района на басейна Mare Ingenii, South Pole-Aitken на далечната страна на Луната. Направен е изводът, че планините имат сравнително ниска и равномерна концентрация на KREEP. Данните подкрепят хипотезата, че сблъсъкът довел до образуването на Mare Imbrium е въздействал и изровил от дълбочина богатия на KREEP материал и го е разпространил в района, като същият ред на образуване се прилага и за South Pole-Aitken, където е регистрирано наличието на KREEP скали. Направени са изводи в посока, че сблъсъците също допълнително са разпространили KREEP материала по повърхността на цялата Луна [9].

Посредством получените данни от магнитометъра на Lunar Prospector са извършени подробни изследвания на остатъчната магнетизация на лунната кора. Потвърдено е наличието на изолирани магнитни аномалии, установени по време на по-ранни мисии и лунни магнитни полета антиподи на Mare Imbrium и Mare Serenitatis, представляващи най-малките магнитосфери или магнитообвивки. Проведеният гравитационен експеримент очертава седем нови гравитационни аномалии и спомага за направата на извода, че Луната има малко Fe ядро с радиус от около 300 km.

SMART - 1

На 27 септември 2003 г. е изстрелян космическият апарат SMART-1 на Европейската Космическа Агенция. Апаратът навлиза в лунна орбита на 17 ноември 2004 г. и се спуска спираловидно, за да достигне на 15 март 2005 г. височина от 400-3 000 km за номинален научен период от шест месеца, с 1 година удължаване на научните експерименти до преднамерения му сблъсък в лунната повърхност на 3 септември 2006 г. [10]. SMART-1 успешно демонстрира усъвършенствано йонно задвижване и приложението на иновативни технологии за контрол на мисията. Електрическото-йонно задвижване позволява на апарата да достигне целта си с едва 82 kg ксеноново гориво [11].

Научните инструменти с които е оборудван лунния орбитален космически апарат са с цел изследване съдържанието на химичните елементи на лунната повърхност. Инструменталният набор на SMART-1 е с маса от 19 kg и включва: миниатюрна камера с висока разделителна способност (AMIE), точков спектрометър в близката инфрачервена област (SIR) за изследване на минералогията и много компактен рентгенов спектрометър (D-CIX) за анализ на химическия състав на повърхността. SMART-1 регистрира данни и извършва изследване на химичния състав на Луната, на геофизичните процеси (вулканизъм, тектоника, образуване на кратери, отлагане на ледове и летливи вещества). Заснема лунната повърхност с висока разделителна способност, като по този начин набавя данни за подготовка на бъдещи изследователски мисии на Луната [12].

Chandrayaan-1

На 22 октомври 2008 г. е изстрелян първият лунен орбитален апарат на Индийската организация за космически изследвания (ISRO) Chandrayaan-1, който влиза в елиптична лунна полярна орбита на 8 ноември 2008 г. и четири дни по късно е позициониран на желаната орбита от 100 km. На 26 април 2009 г. повреда на звездният сензор довежда до промяна на орбиталната височината на 200 km, маневра извършена с цел да се намали броя на необходимите корекции за поддържане на орбитата. На 28 август 2009 г. е изгубена комуникация с апарата, което води до прекратяване на мисията.

Chandrayaan-1 е оборудван с инструменти на НАСА, ЕКА и България, която доставя дозиметър (RADOM) [13] за наблюдение на потока от космически енергийни частици по пътя към Луната и в лунната среда, камера за картографиране на терена (TMC), хиперспектрална камера (HySI), нискоенергиен рентгенов спектрометър, високоенергиен рентгенов спектрометър (HEX) и лунен лазерен инструмент за определяне на разстоянието (LLRI). Инструментите са предназначени да събират минералогични, химични и фото-геоложки данни. В оборудването са включени и предоставените от НАСА миниатюрен радар за изображения (Mini-SAR) с който да се изследват полярните региони на Луната и Moon Mineralogy Mapper (M3) за картографиране химическия състав на Луната с висока разделителна способност. ЕКА предостави Sub-keV атомно отразяващ анализатор (SARA) за изучаване на взаимодействията слънчев вятър – лунна повърхност и нейните магнитните аномалии. Научните инструменти на лунния орбитален апарат Chandrayaan-1 са с маса от приблизително 55 kg [14].

Данните регистрирани от рентгеновия спектрометър показват анортозитен терен със състав с високо съдържание на Al, беден на Ca и нисък на Mg, Fe и Ti в близкия южен високопланински регион. Направени са изводи за присъствието на няколко млади вулканични региона благодарение на камерата за картографиране на терена и M3. Тези данни сочат към наличието на динамична и вероятно все още активна вътрешност на Луната, за разлика от общоприетата концепция. Откриването на магнезиеви шпинелни анортозити и откриването на кристални анортозитни експозиции с километрични размери от M3 подкрепят хипотезата за образуване на глобален магмен океан на Луната и неговата диференциация в началото на лунната еволюционна история.

Lunar Reconnaissance Orbiter

На 18 юни 2009 г. е изстрелян Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) първият от серия мисии на НАСА за роботизирано изследване на Луната, търсене на безопасни и атрактивни места за кацане за бъдещи роботизирани мисии и завръщане на хората на Луната. LRO изследва за повърхностни ресурси и измерва лунната радиационна среда. Изследователската мисия започва на 15 септември 2009 г. и завършва на 15 септември 2010 г., когато оперативната отговорност за LRO е прехвърлена на дирекцията за научни мисии на НАСА за двугодишна научна мисия с нов набор от научни цели. След нейното успешно завършване започва нова разширена научна мисия активна и функционираща и днес. Lunar Reconnaissance Orbiter е оборудван със седем инструмента. Лунен орбитален лазерен алтиметър (LOLA), който измерва на глобално ниво топографията на лунната повърхност с висока разделителна способност, наклоните на представляващите интерес бъдещи места за кацане, Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC), която заснема изображения на лунната повърхност. Широкоъгълните изображения от LROC помагат за установяване на осветеността на полярните области и за откриването на потенциални ресурси. Неутронен детектор за изследване на Луната (LEND), който картографира потока от неутрони от лунната повърхност, за наличието на воден лед, и прави измервания на космическата радиационна среда. Diviner Lunar Radiometer Experiment (DLRE), който регистрира температурата на цялата лунна повърхност с приблизително 300 m хоризонтална разделителна способност, за откриване на най-студените места и наличието на постоянен лед. Luman-Alpha Mapping Project (LAMP), който картографира цялата лунна повърхност в далечния ултравиолетов спектър. LAMP търси повърхостен лед и скреж в полярните региони и предоставя изображения на региони намиращи се в постоянна сянка, осветени само от звездна светлина. Демонстрацията на технологията е усъвършенстван радар (mini-RF), който регистрира радарни изображения и интерферометрия в X- и S-канал, използвайки лек радар със синтезирана апертура. Тези измервания предоставят нова информация относно физическите свойства на лунната повърхност, лунната среда и разпределението на летливите вещества и др. [15].

Заклучение

Луната е най-близкия космически обект до Земята, нейната гравитация е по-слаба от земната, на нея липсва атмосфера, далечната ѝ страна е свободна и защитена от радиовълни и отразена от Земята радиация. Условието за провеждане на дистанционни изследвания са различни от тези на Земята и са уникални по своята същност. Съвременните високотехнологични производствени възможности и нивото на миниатюризация в производството на електроника подновяват научния интерес към изследване на Луната. Установено е, че основният химически състав на Луната е близък до този на Земята и включва елементите (O, Mg, Al, Si, Ca, Ti и Fe) и радиоактивните елементи (K, Th и U). Орбиталната станция Gateway част от програмата Artemis на НАСА и ЕКА в близко бъдеще ще представлява уникална платформа за провеждане на междудисциплинарни изследвания. Научните инструменти на борда, както вътрешни, така и външни за Gateway, имат потенциала да разкрият нови открития в космическата наука, науката за Земята и дълбокия космос [16].

Литература:

1. Мардиросян, Г., Димитров, Д., И. Иванова, Л. Филчев, Информационни технологии за наблюдение на Земята от Космоса, Практическо ръководство, част 1, Институт за космически изследвания и технологии – БАН, София, 2020.
2. Slyuta, E. (2021). The Luna program. In *Sample Return Missions* (pp. 37-78). Elsevier.
3. Crawford, I. A., Joy, K. H., & Anand, M. (2014). *Lunar Exploration. Encyclopedia of the Solar System*, 555–579.
4. Chowdhury, Arup Roy. Mission and Science Instruments: Chandrayaan-1 perspective SEG, SEDA, SAC Geomatics-2010 pre-conference tutorial on “Planetary Geomatics”, February 2-3, 2010, Ahmedabad
5. Exploring the Moon. A Teacher's Guide with Activities, NASA EG-1997-10-116-HQ
6. Goswami, J. N. An overview of the Chandrayaan-1 mission. Physical Research Laboratory, Ahmedabad-380009, India 41st Lunar and Planetary Science Conference (2010)
7. Sorensen, T. C. & Spudis, P. D. (2005). *The Clementine mission —A 10-year perspective. Journal of Earth System Science*, 114(6), 645–668.
8. Spudis, P.D., Shoemaker, E., Acton, C., Burratti, B., Duxbury, T., Baker, D., Smith, D., Blamont, J., Daview, M., Eliason, E., McEwn. A., Lucey, P., Pieters, C., (1994). Lunar and Planetary inst. Houston, TX., United States
9. Binder, A. B. (1998). *Lunar Prospector: Overview. Science*, 281(5382), 1475–1476.
10. Foing, B. H., O. Camino, J. Schoenmakers, J. de Bruin, D. Gestal, M. Alonso, R. Blake, S. Ricken, P. Pardo, D. Koschny, D. Frew, M. Almeida, M. Sarkarati, J. Volp, G. Schwehm, J. L. Josset, S. Beauvivre, Z. Sodnik, M. Grande, U. Keller, A. Nathues, P. Ehrenfreund, G.D. Racca et al., SMART-1 mission overview from launch, lunar orbit to impact SMART-1 STWT and Spacecraft Operations Team, ESTEC/SCI-S, postbus 299, 2200 AG Noordwijk, NL, Europe
11. SMART-1. https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/SMART-1
12. Foing, B. H. (2006). *Results from the SMART-1 lunar mission*. Proceedings of the International Astronomical Union, 2(14).
13. Dachev, T.P., Tomov, B.T., Matviichuk, Y.N., Dimitrov, P.S., Vadawale, S.V., Goswami, J.N., De Angelis, G. and Girish, V., 2011. An overview of RADOM results for earth and moon radiation environment on Chandrayaan-1 satellite. *Advances in space research*, 48(5), pp.779–791.
14. Bhandari, Narendra & Srivastava, N.. (2014). Active Moon: evidences from Chandrayaan-1 and the proposed Indian missions. *Geoscience letters*. 1. 10.1186/s40562-014-0011-y.
15. Chin, G., Brylow, S., Foote, M., Garvin, J., Kasper, J., Keller, J., ... Zuber, M. (2007). *Lunar Reconnaissance Orbiter Overview: The Instrument Suite and Mission. Space Science Reviews*, 129(4), 391–419. doi:10.1007/s11214-007-9153-y
16. Smith, M., Craig, D., Herrmann, N., Mahoney, E., Krezel, J., McIntyre, N. and 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.