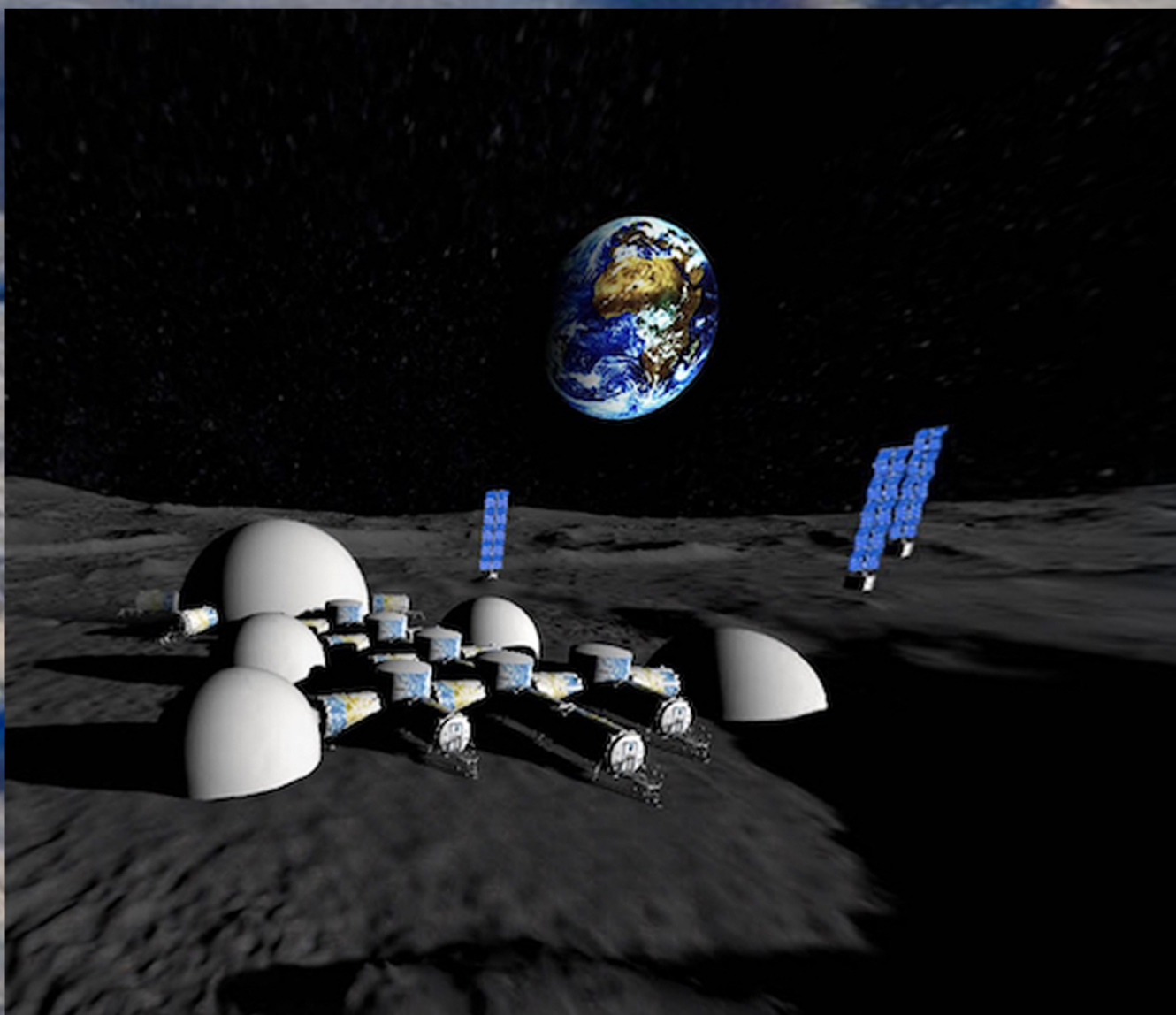


АРХІТЕКТУРНО-КОНСТРУКТИВНІ ТА ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ЖИТЛОВИХ МОДУЛІВ МІСЯЧНОЇ БАЗИ.

ТОМ 1



2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ДВНЗ «ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ»**

**АРХІТЕКТУРНО-КОНСТРУКТИВНІ ТА ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНІ
РІШЕННЯ ЖИТЛОВИХ МОДУЛІВ МІСЯЧНОЇ БАЗИ.
ТОМ 1**

Колективна монографія

**За загальною редакцією
д-ра техн. наук, професора Миколи Савицького**

**Дніпро
2021**

УДК 72:711.427(158)

А 87

Рекомендовано до друку Вченою радою ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» (Протокол №7 від 28.12.2021 р.)

Авторський колектив:

Микола Савицький, д.т.н., проф., головний редактор; **Світлана Шехоркіна**, д.т.н., доц.; **Марина Бордун**, PhD; **Владислав Данішевський**, д.т.н., проф.; **Тетяна Нікіфорова**, д.т.н., проф.; **Галина Євсєєва**, д.н.держ-упр., проф.; **Сергій Шатов**, д.т.н., проф.; **Олександр Адегов**, к.т.н., доц.; **Віктор Воробйов**, к.арх., доц.; **Оксана Зінкевич**, к.т.н., доц.; **Марина Ляховецька-Токарева**, к.т.н., доц.; **Олександр Конопляник**, к.т.н., доц.; **Олена Коваль**, к.т.н., с.н.с.; **Анатолій Титюк**, к.т.н., доц.; **Олександр Савицький**, к.т.н.; **Тетяна Шевченко**, к.т.н., доц.; **Євген Юрченко**, к.т.н., доц.; **Анастасія Гайдар**, к.т.н.; **Ольга Бондаренко**, архітектор; **Олександр Лясота**, інженер; **Ігор Марченко**, інженер; **Андрій Савицький**, магістр; **Валерій Іншаков**, інженер; **Наталія Куліченко**, архітектор; **Віталій Страшко**, інженер.

Рецензенти:

Назаренко І.І., д-р техн. наук, професор, президент Академії будівництва України;

Оковитий С.І., д-р хім. наук, професор, ректор Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

Сухий К.М., д-р техн. наук, професор, ректор Українського державного хіміко-технологічного університету.

А 87 **Архітектурно-конструктивні та інженерно-технічні рішення житлових модулів Місячної бази. Том 1:** колективна монографія / М. Савицький, С. Шехоркіна, М. Бордун [та ін.]; за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. М. Савицького. – Дніпро: ФОП Удовиченко О.М., 2021. – 102 с.

ISBN_978-966-323-228-7

У колективній монографії (Том 1) представлені результати досліджень щодо інноваційної архітектурної концепції створення житлово-виробничого середовища та інфраструктури Місячної бази, приведений історичний огляд проектів і програм освоєння космічного простору, зокрема супутника Землі – Місяця; визначено технічні вимоги, пов'язані з екстремальними умовами функціонування техніки, об'єктів будівництва та людей; узагальнені принципи проектування штучних об'єктів в місячному середовищі.

УДК 72:711.427(158)

© Савицький М. В., 2021

© ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», 2021

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПРОЕКТІВ КОСМІЧНОЇ ЕРИ	6
1.1. Етапи освоєння Місяця	6
1.2. Проекти-програми освоєння Місяця	9
1.3. Архітектурні концепції	29
1.4. Експериментальні архітектурно-конструктивні розробки місячних модулів	39
1.5. Загальні рекомендації щодо проектування, будівництва та функціонування місячної бази	48
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 1	54
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ УМОВ МІСЯЧНОГО СЕРЕДОВИЩА ТА ЇХ ВПЛИВУ НА ПРОЕКТУВАННЯ МІСЯЧНОГО МОДУЛЯ	55
2.1. Топологія поверхні	55
2.2. Властивості Місячного ґрунту – реголіту	59
2.3. Сейсмічна активність	66
2.4. Гравітація	72
2.5. Магнітне поле	76
2.6. Атмосфера	78
2.7. Місячний пил	79
2.8. Освітлення і температурний режим	81
2.9. Випромінювання	85
2.10. Метеороїди	92
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	97
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 2	99
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	101

ВСТУП

На сьогодні ряд країн світу розробляють проекти з освоєння космічного простору, зокрема супутника Землі – Місяцю. Державне космічне агентство України підписало в рамках програми NASA «Артеміда» домовленості щодо принципів співпраці в цивільному дослідженні й використанні Місяця, Марсу, комет та астероїдів в мирних цілях. Очікується, що на Місяці є доступні поклади речовин, які потрібні, насамперед, для організації виробництва безпосередньо на місці. Існують декілька варіантів будівництва місячних баз. Одним із таких перспективних варіантів є використання місячного ґрунту в якості будівельного матеріалу, технології 3D-друку будівельних об'єктів, напрацювання в напрямку створення автономних будівель. Специфікою Місяцю є суворі кліматичні умов: надзвичайно розріджена газова оболонка, високий перепад температур (від -190 до $+120^{\circ}\text{C}$), вплив сонячного вітру, радіації, наявність сейсмічної активності. Це вимагає при розробці і проектуванні конструкцій враховувати повний життєвий цикл об'єктів місячної бази, який включає створення архітектурної концепції, інженерно-технічні рішення життєзабезпечення, конструктивні рішення високофункціональних будівельних конструкцій та матеріалів для їх виготовлення. Сьогодні існує ряд проектів створення місячного життєвого середовища в рамках конкурсів. На даний момент такі задачі комплексно не вирішувались як в Україні, так і в світі.

Сьогодні відбувається певний ренесанс досліджень Місяця – про плани дослідження Місяця у XXI столітті заявили Європейський Союз, Індія, КНР, США, Японія. У Росії готуються місії «Місяць-25», «Місяць-26» і «Місяць-27». Завершилися дослідження НАСА LADEE. Це підтверджується деклараціями провідних світових космічних держав, таких як США, Росія, Франція, Китай, Індія та Південна Корея, які мають власні космічні програми. Анонсуються сміливі проекти щодо відновлення польотів на супутник Місяць і навіть щодо організації місячного поселення. Росія, США, Євросоюз та Китай вже не перший рік працюють у цьому напрямі.

Дослідження Місяця за допомогою космічних апаратів почалися ще 1959 році. Тоді радянська автоматична станція «Місяць-3» вперше сфотографувала зворотний бік Місяця. Надалі зйомка місячної поверхні неодноразово проводилася радянськими та американськими космічними апаратами. До теперішнього часу складено докладні карти обох півкуль Місяця та її окремих регіонів, на яких зафіксовано об'єкти розміром до 10 м [1].

Важливі дослідження було проведено радянськими автоматичними станціями серії «Місяць» та американськими апаратами «Сервейор» на її поверхні. Першою була «Місяць-9», яка здійснила м'яку посадку на Місяць у лютому 1966 року.

Місяць став першим і поки що єдиним небесним тілом, на яке в 1969 р. ступила нога людини, американського астронавта Нейла Армстронга. Надалі в ході реалізації американської програми «Аполлон» на Місяці побувало 12 астронавтів, які пробули там загалом 300 годин. Тривалий час працювали на Місяці радянські самохідні апарати «Місяцехід-1» та «Місяцехід-2», які обстежили місячну поверхню на площі понад 100 км². Американські кораблі «Аполлон» та радянські автоматичні станції доставили на Землю близько 400 кг зразків місячних порід, які були піддані детальному хімічному аналізу у лабораторних умовах на Землі.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПРОЕКТІВ КОСМІЧНОЇ ЕРИ

1.1. Етапи освоєння Місяця

Місячні бази у першій «Місячній гонці» [2]. У ході перших «місячних перегонів» 1960-х років дві космічні наддержави — США та СРСР — мали плани спорудження місячних баз, які не були реалізовані. У США опрацьовувалися аванпроекти місячних військових баз Лунекс (Lunex Project) і Горизонт (Project Horizon), а також були технічні пропозиції щодо місячної бази Вернера фон Брауна. У першій половині 1970-х років, під рук. академіка В. П. Барміна московськими і ленінградськими вченими розроблявся проект довгострокової місячної бази, в якому, зокрема, вивчалися можливості обвалування споруд спрямованим вибухом для захисту від космічного випромінювання (винаходи А. І. Мелуа з використанням технологій Альфреда Нобеля). Більш детально, включаючи макети експедиційних транспортних засобів та модулів, було розроблено проект місячної бази СРСР «Зірка», який мав бути реалізований у 1970-х—1980-х роках, як розвиток радянської місячної програми, згорнутої після програву СРСР у «місячній гонці» зі США.

Lunar Oasis. У жовтні 1989 року, на 40-му конгресі Міжнародної авіаційної федерації співробітники НАСА Майкл Дьюк (англ. Michael Duke), голова підрозділу досліджень Сонячної системи Космічного центру імені Ліндона Джонсона у Х'юстоні, та Джон Ньехофф (англ. John Niehoff) із Science Applications International Corporation (SAIC) презентували проект місячної станції Lunar Oasis. Досі цей проект вважається дуже опрацьованим та цікавим за низкою основних рішень, одночасно оригінальних та реалістичних. Десятирічний проект Lunar Oasis передбачав три стадії, що сумарно передбачали 30 польотів, половина з яких пілотовані (по 14 т вантажу); безпілотні старти оцінювалися по 20 т вантажу кожен. Час реалізації програми – 10 років.

Місячні основи у «Другій місячній гонці» [2]. На початок ХХІ століття відкриття на полюсах Місяця покладів льоду стимулювало початок «других місячних перегонів» між США (програма «Артеміда»), КНР (Місячна програма Китаю), Росією (Російська місячна програма), Євросоюзом (програма «Аврора»), Японією та Індією. Усі ці програми передбачають створення на Місяці баз. НАСА розробляла космічну програму «Сузір'я», в рамках якої має розроблятися нова космічна техніка та створюватися необхідна інфраструктура для забезпечення польотів нового космічного корабля до МКС, а також польотів на Місяць, створення постійної бази на Місяці та перспективи польотів на Марс. Завдання картографування можливих майбутніх місць посадок та бази вирішувала зокрема станція Lunar Prospector раніше. Пілотовані польоти на Місяць

планувалися з 2019-2020 років. Фінансування програми у 2011 році припинено.

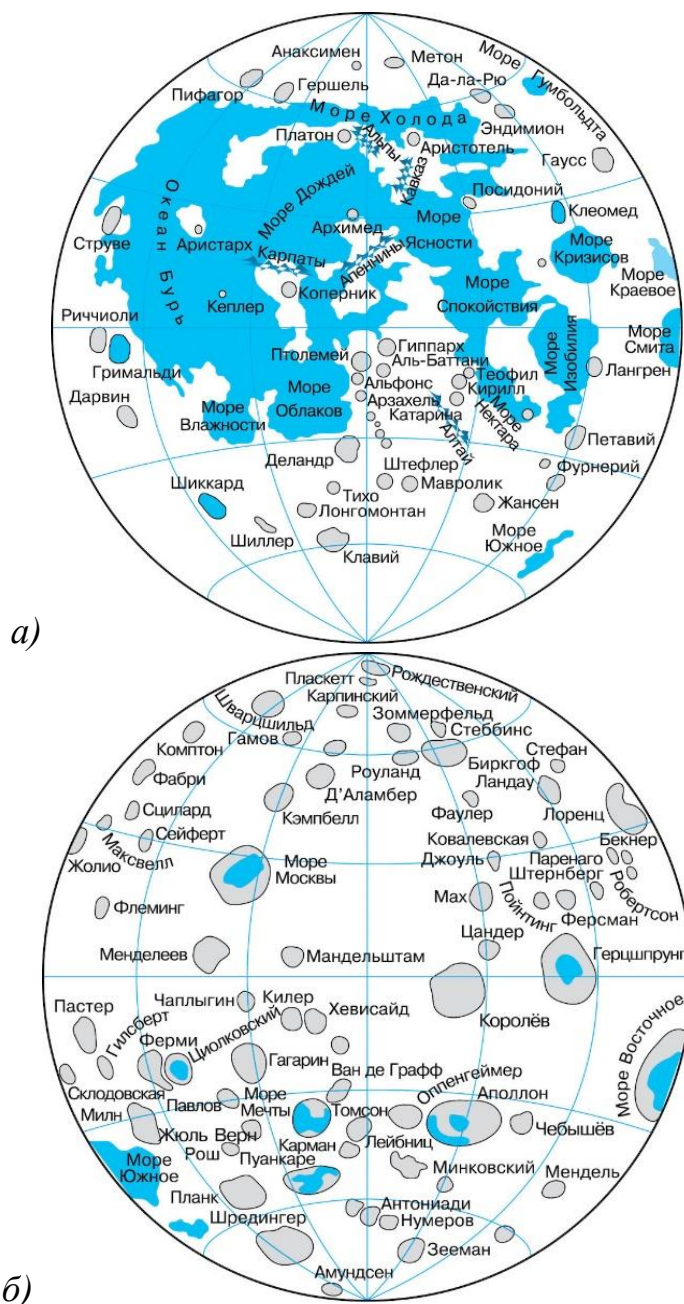


Рис. 1.1. Мапа видимої півкулі Місяця (а). Мапа зворотного боку Місяця (б).

У лютому 2010 року НАСА представило новий проект: «Аватари» на Місяці. Суть його полягає в організації експедиції на Місяць за участю роботів-аватарів (що являють собою пристрій телеприсутності) замість людей. У цьому випадку інженери, які займаються організацією польоту, позбавляють себе необхідності використання важливих систем життєзабезпечення, і завдяки цьому застосовується менш складний і дорогий космічний корабель. Для управління роботами-аватарами експерти НАСА пропонують використовувати високотехнологічні

костюми дистанційної присутності (на зразок костюма віртуальної реальності). Один і той самий костюм можуть «одягати» кілька фахівців із різних галузей науки по черзі. Наприклад, під час вивчення особливостей місячної поверхні, управляти «аватаром» може геолог, у костюм телеприсутності може також одягатися фізик.

У травні 2019 року адміністратор НАСА Джим Брайденстайн оголосив про початок програми Артеміда (названої на честь грецької богині полювання, сестри Аполлона). Програма ділиться на два етапи: *Перший етап* включає висадку на Місяць в 2024 році і включає в себе: пілотований орбітальний обліт Місяця Артеміда-2, початок будівництва міжнародної близькомісячної станції Gateway, висадка екіпажу з першою жінкою на Місяці в місії Артеміда-3. *Другий етап програми* – польоти на Місяць та створення місячної інфраструктури. На літо 2019 року програма не отримала належного фінансування. Планується, що пілотовані польоти будуть здійснені за допомогою PH SLS та корабля «Оріон».

Амбіційний план Європейського Космічного Агентства «Аврора» передбачає зрештою після 2030 року експедиції та бази на Місяці. Перша європейська місячна станція Сمارт-1 протягом року та семи місяців займалася картографуванням поверхні Місяця, а також побудовою карток залягання різних мінералів.

Про свої плани освоєння Місяця неодноразово заявляв і Китай. 24 жовтня 2007 року з космодрому Січан було успішно запущено першого китайського супутника Місяця Чан'є-1. У його завдання входило отримання стереознімків, за допомогою яких згодом виготовлять об'ємну карту місячної поверхні. У майбутньому КНР розраховує заснувати на Місяці наукову базу. Згідно з китайською програмою, освоєння природного супутника Землі намічено на 2040-2060 роки. Проект місячної бази у Китаї розробляється під керівництвом генерального конструктора Місячної програми Китаю у Вейженя.

Японське агентство з космічних досліджень планувало до 2030 року ввести в дію станцію на Місяці. У 2007 році космічною станцією «Кагуя» Японія розпочала орбітальні дослідження Місяця. У березні 2010 року Японія вирішила відмовитися від пілотованої місячної програми через її надмірну витратність на користь роботизованих поселень.

Індія у 2008 році надіслала до Місяця першу АМС «Чандраян-1» з метою тривимірного топографування та радіозондування для складання карти хімічних елементів поверхні у пошуках металів, води та гелію-3. Індійська організація космічних досліджень представила плани швидкого відправлення місяцехода та спільних або незалежних пілотованих польотів до Місяця у віддаленому майбутньому (після 2025—2030 р.).

Російська місячна програма XXI століття [2]. У 2007 році Роскосмос оголосив про план, що включає висадку людини на Місяці до 2025 року і розгортання там постійної місячної бази через кілька років. У 2014 році стало відомо про проект концепції російської місячної програми, в якій запропоновано три етапи: 1 етап (2016—2025 р.р.) - відправка на

Місяць автоматичних міжпланетних станцій «Місяць-25», «Місяць-26», «Місяць -27» та «Місяць-28». Вони повинні будуть визначити склад та фізико-хімічні властивості місячного полярного реголіту з водяним льодом та іншими летючими сполуками. Крім того, завданням апаратів стане вибір найбільш перспективного району в області Південного полюса Місяця для майбутнього розгортання там полігону та місячної бази; 2 етап (2028-2030 р.р.) - пілотовані експедиції на орбіту Місяця без висадки на її поверхню. 3 етап (2030-2040 рр.) - Висадка космонавтів в районі потенційного розміщення місячного полігону і розгортання перших елементів інфраструктури з місячної речовини. Зокрема пропонується почати будувати елементи місячної астрономічної обсерваторії, а також об'єктів для моніторингу Землі. До 2050 року планується побудувати базу і полігон з видобутку корисних копалин. У 2015 році з'явилися повідомлення про затримку цих планів на кілька років від заявленого графіка через зменшення фінансування.

Європейський проект [2]. У квітні 2018 року Європейська космічна агенція оголосила про початок робіт над проектом створення постійної бази на поверхні Місяця. Проект створення бази розрахований на чотири етапи, з 2020 до 2062 року. *Перший етап* (2020—2030 рр.) — картографування поверхні Місяця та розробка важкої ракети-носія «Криптон», розгінного та посадкового місячних модулів. *Другий етап* (2030-2032 рр.) - Визначення місця майбутньої бази, доставка «Криптоном» чотирьох космонавтів і модулів для створення самої бази, виведення на орбіту космічної станції. *Третій етап* (2032—2042 р.р.) — доставка та монтаж командного та ремонтного модулів, енергетичної установки живлення бази та місяцехода. *Четвертий етап* (2042-2062 рр.) - створення систем життєзабезпечення, виробничої бази та обсерваторії, запуск до 2062 року постійної бази без необхідності постійного перебування людини на Місяці.

1.2. Проекти-програми освоєння Місяця

Проект поселення на Місяці Дніпровського КБ «Південне»

Дніпровське конструкторське бюро "Південне" розробило проект промислово-дослідницької бази на Місяці. Презентація відбулася на міжнародному симпозіумі Асоціації "Місячного селища" у Токіо [3].

У проекті розглядають Місяць як складову майбутньої космічної інфраструктури. Міжнародна місячна база може бути для видобутку ресурсів, і навіть бути пересадочним майданчиком для запуску космічних кораблів на інші планети (Рис. 1.2).

Проект промислово-дослідницької бази на Місяці це транспортна система для доставки екіпажу та вантажів на поверхню Місяця та повернення на Землю, конструкції місячних модулів, засоби для

пересування по поверхні Місяця. Подано основні технічні характеристики систем, що розробляються. У поселенні будуть кисень та вода. Крім цього, КБ "Південне" розробляє ракету-носіє "Криптон", яка доставлятиме на Місяць вантажі та екіпаж із чотирьох космонавтів. Будівництво бази вимагатиме п'ять запусків ракети.

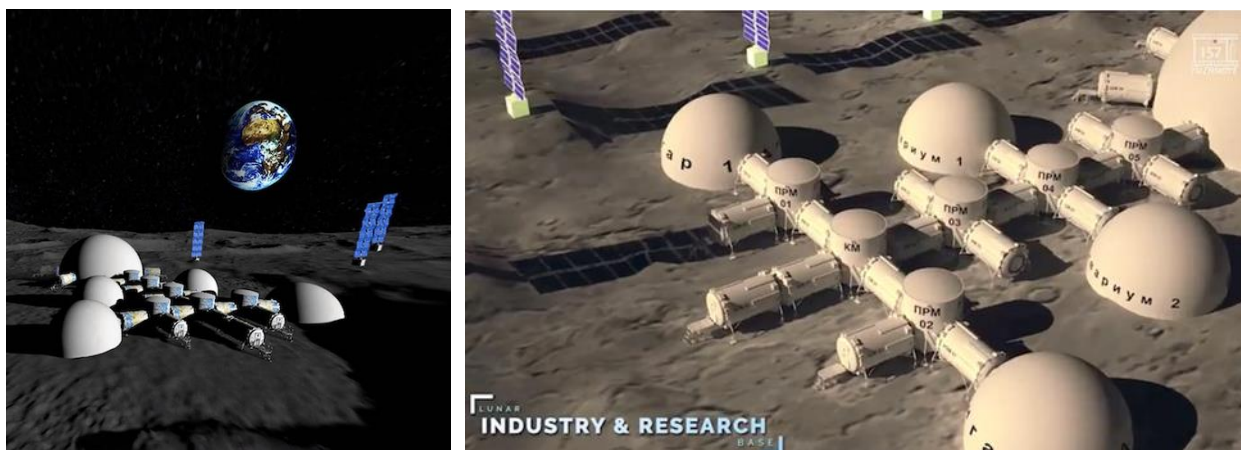


Рис. 1.2. Промислово-дослідницька база на Місяці. КБ «Південне». Макет.

«Поселення на Місяці» - проект Європейського космічного агентства (ЄКА)

У 2015 році генеральний директор ЄКА, професор Йохан-Дітріха Вернер, представив концепцію проекту «Місячне поселення», яка може стати полігоном з відпрацювання технологій, необхідних для експедиції на Марс [4]. Так, професор Йохан-Дітріх Вернер висловлює думку, що технологію будівництва марсіанської бази за допомогою гігантського тривимірного принтера було б розумно спершу випробувати на Місяці. На будь-якій далекій планеті землянам доведеться навчитися виживати у тяжких умовах. Якщо перше позаземне поселення знаходитиметься всього за чотири дні літа від Землі, а не за шість місяців, це завдання виявиться набагато простіше - особливо при виникненні надзвичайних ситуацій.

Місячне поселення Вернера має стати багатонаціональним поселенням астронавтів і має на увазі суттєво ширшу міжнародну кооперацію порівняно з програмою МКС. "Під місячним поселенням я маю на увазі не просто село в кілька будинків з церквою і мерією, - пояснює Вернер. У проекті повинні брати участь партнери з усього світу, які вносять свій внесок у вигляді автоматичних та пілотованих експедицій та забезпечення зв'язку з Землею за допомогою автоматичних станцій ". За словами Вернера, для освоєння Місяця є вагомі причини - тут і безпосередня користь для науки, і можливість використання супутника як трамплін для подальших досліджень Сонячної системи, розмістивши на

«Зворотній стороні» Місяця телескопи для спостереження за далекими регіонами Всесвіту та вивчення самого Місяця. Перш ніж вирушати на Червону планету Марс, необхідно відпрацювати технології на Місяці [2].

Через 40 років Європейське космічне агентство планує запустити проект, розроблений спільно з архітектурним бюро "Foster+Partners" з освоєння Місяця за допомогою технології 3D друку [5]. Все це стане можливим завдяки роботам, які зі швидкістю 1 модуль на тиждень будуватимуть житлові модулі з місячного ґрунту. Один такий модуль розрахований для роботи та проживання 4-х осіб. Він оснащений системою життєзабезпечення, а завдяки товстим стінам надійно захищатиме людей від зовнішнього впливу, метеоритів та радіації.



Рис. 1.3. Концепція місячного поселення. ЄКА

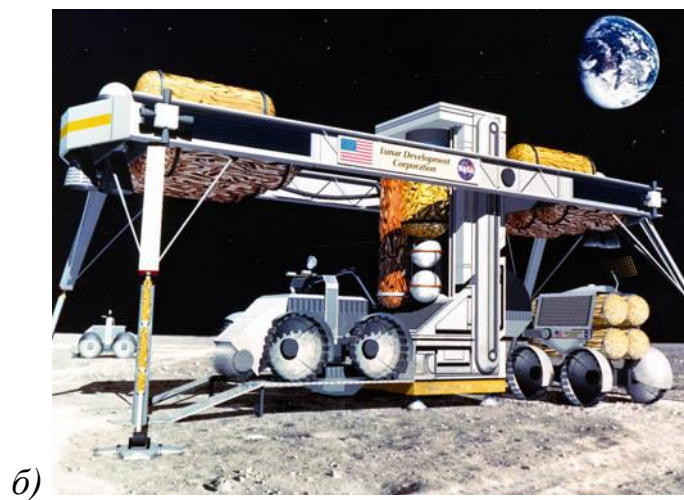
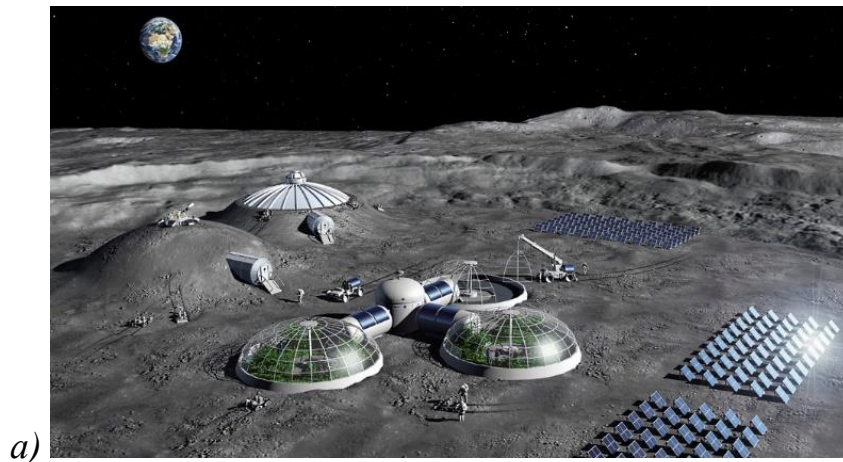
Місячна база складатиметься на 90% з місячного ґрунту, що мінімізує кількість матеріалу із землі. Найменша вага таких конструкцій забезпечить пориста структура будівельних блоків. В даний час випробувані на землі роботи, будують модулі зі швидкістю 2 куб/годину. Наступна версія роботів буде швидше - 3 кубометри на годину.

Програма Artemis NASA: будівництво станції Gateway на орбіті Місяці

В рамках програми Artemis NASA планують будівництво станції Gateway на орбіті Місяця. Розглядають етапи освоєння Місяця (висадка на

поверхні та будівництво місячної бази), а також задачі, функцію та вигоду, які буде виконувати база [6].

Розташування місячної бази. На відміну від експедицій, які теоретично можуть висаджуватися будь-куди, для постійного поселення дуже важливий вибір місця. Його переваги будуть використовуватись, а недоліки доведеться терпіти роками. І параметри місячної орбіти визначають кілька потенційно цікавіших місць для бази.



*Рис. 1.4. Проект Місячної бази, ЄКА – 2020 р. Загальний вигляд (а);
автоматичний кислородний завод на Місяці, NASA (б)*

В рамках програми Artemis NASA визначено комплекс завдань освоєння супутника Землі - Місяця. Вже зараз очевидними є кілька потенційно цікавих напрямків роботи місячної бази:

- людство навчатиметься жити на іншому небесному тілі;
- дослідження ресурсів та вивчення способів використання місцевих ресурсів;
- логістичний напрямок;
- збір наукових даних.

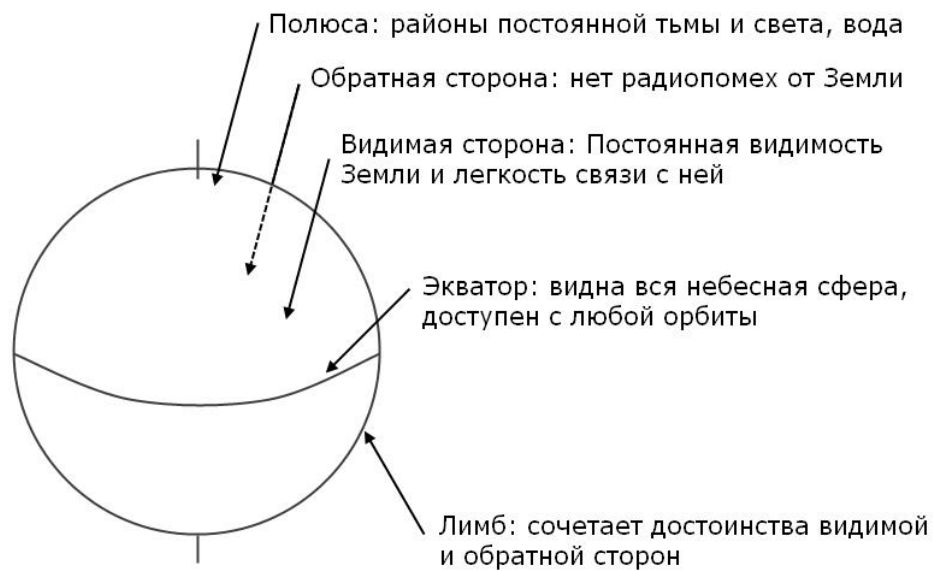
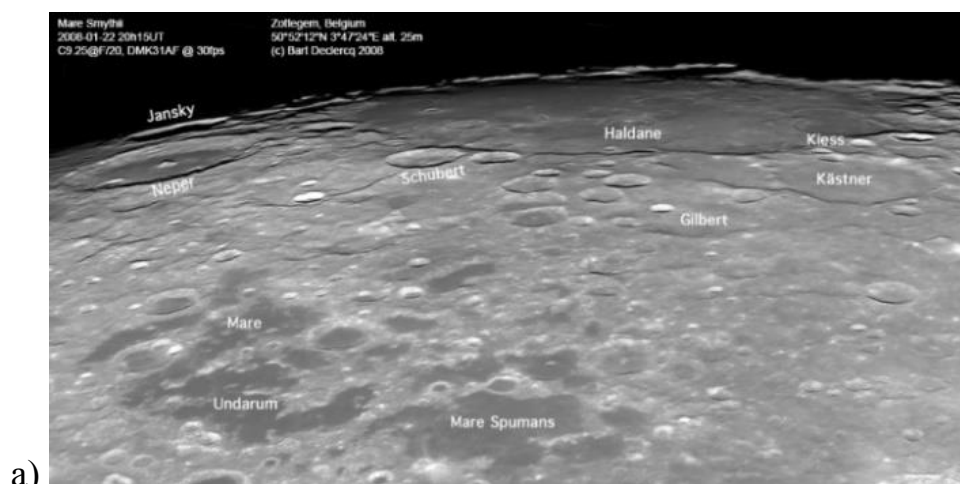
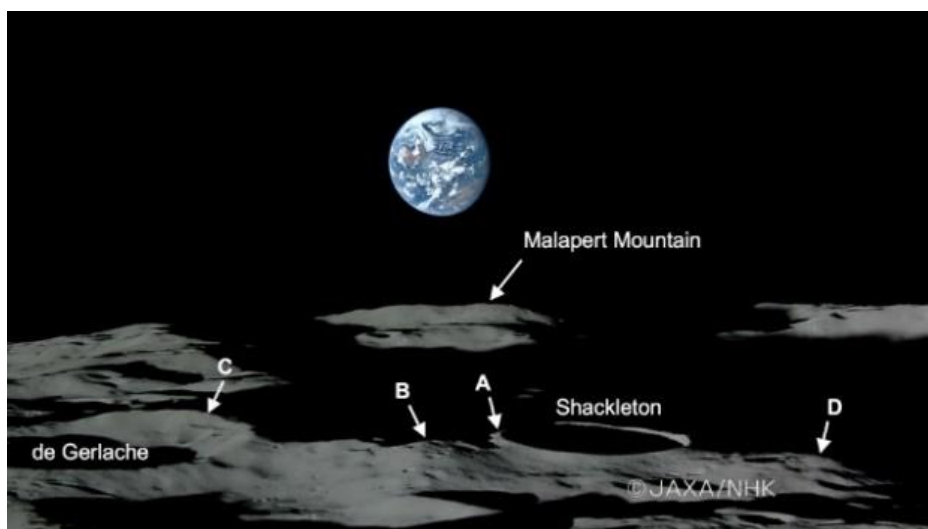


Рис. 1.5. Параметры місячної орбіти.



a)



б)

Рис. 1.6. Південний полюс Місяця, зображення JAXA (а); Море Сміта, вид на Землю (б)

Незважаючи на те, що місячна база залишається справою неблизького майбутнього, вже зараз приблизно зрозуміло, для чого вона потрібна, і вже сьогодні ведуться роботи зі створення технологій, які застосовуватимуться на ній.



Рис.1.7. Концепція місячної бази 21 століття, ілюстрація NASA

Концепт місячної станції. Житло для астронавтів, ЄКА/НАСА

Відома архітектурна фірма Skidmore, Owings & Merrill, розробляє дизайн доквілля для майбутніх космонавтів - жителів Місячної станції [7]. Запропонована проектна пропозиція оцінювалася експертами Європейського космічного агентства.

Робота над дослідженням розпочалася у 2020 році. Проект доквілля пройшов дослідження в Центрі паралельного проектування (CDF) ЄКА.

Концепція докiлля. Взявши за вiдправну точку надувний модуль ВЕАМ, який зараз прикрiплений до Мiжнародної космiчної станцiї, архiтектори спроектували особливу конструкцiю корпусу. Головний принцип його полягає в тому, що вiн забезпечує максимально можливе співвiдношення обсягу до маси. Пiсля приземлення на поверхнi Мiсяця конструкцiя збiльшиться вдвiчi за допомогою надування.



Рис. 1.8. Концептуальний проект чотирирiвневого «Мiсячного будинку», ЄКА/НАСА

Розташування. Конструкцiю встановлять на краю кратера Шеклтона поряд iз пiвденним полюсом Мiсяця. Це найкраще мiсце, враховуючи температурнi перепади мiсячних днiв i ночей, якi тривають по два тижнi. Тут доступне майже безперервне сонячне свiтло для використання сонячної енергiї, постiйний вид на Землю i доступ до вiдкладень водяного льоду в сусiднiх краях.

Чотириповерховий модуль буде надуватися або на мiсцi астронавтами, або за допомогою всюдиходiв. Вони, своєю чергою, дистанцiйно управляються зi станцiї Gateway бiля Мiсяця. «Мiсячний дiм» може пiдтримувати життя i комфорт екiпажу з чотирьох осiб до 300 днiв.

Маса конструкцiї понад 58 тонн, щоб доставити її на Мiсяць, використовуватиметься важка пускова установка.

Захист вiд радiацiї. Радiацiйний аналіз вплинув на розмiщення функцiональних зон у модулі. Примiщення для екiпажу розмiщуються на нижньому рiвнi. Розробники дизайну хотiли, щоб примiщення служило притулком для екiпажу пiд час сонячних штормiв. На цьому рiвнi також зберiгатиметься система життєзабезпечення. Вона забезпечує додатковий

захист від радіації. Крім того, конструкція передбачає можливість облицювання місячним матеріалом, щоб сильніше захистити екіпаж від випромінювання.



Рис. 1.9. Дизайн середовища проживання для майбутніх космонавтів — жителів Місячної станії, ЄКА/НАСА.

Життєзабезпечення. Середовище проживання поєднує традиційні системи життєзабезпечення з регенеративними системами замкнутого циклу, над якими працює довгострокова програма ESA MELiSSA. Вона дозволяє вирощувати їжу прямо на місці. Енергетичні потреби докілья — оцінювані в 60 кВт з досвіду МКС — задовольнятимуться з використанням або сусідньої сонячної електростанції, або наземного ядерного реактора. Не менш важливими є і радіатори. Вони потрібні для відведення відпрацьованого тепла та підтримки комфортної температури всередині приміщення – 22 °С. Команда CDF, спираючись на минулий досвід роботи з Rosetta, запропонувала додати жалюзі, що закриваються, для управління роботи радіатора в короткі, але холодні полярні ночі.

Посадка - запуск докілья. Інший ключовий фактор дизайну - мінімізація контакту з липким абразивним місячним пилом. Розробники відзначають, що приземлення на Місяць посадкового модуля підніме

багато пилу, який шкідливий як для людей, так і для обладнання. Середовище проживання взаємодіятиме з окремими корпусами шлюзів, призначеними для видалення пилу зі скафандрів та обладнання, щоб зменшити кількість пилу. Одна з найбільших проблем, зазначених у CDF, — її розмір. Середовище проживання, включаючи все його попередньо змонтоване внутрішнє обладнання, матиме масу понад 58 тонн. Зараз це за межами можливостей ракет-носіїв, що діють. Творці Місячної станції, у свою чергу, заявляють, що будуть використовувати системи запуску НАСА, або космічний корабель SpaceX, який не матиме проблем із вагою конструкції. Однак космоліт від Ілона Маска ще перебуває на ранній стадії розвитку.

Функціональна організація. Як тільки перше середовище проживання буде створено, до нього по черзі приєднуються додаткові модулі, адаптовані для конкретних функцій: дослідження, виробництво, культура харчування та туризм. Це дозволить базі поступово розширитися до села, а потім, зрештою, до цілого місячного міста.

Робота з проектування цього довкілля корисна сама по собі, незалежно від того, чи буде вона побудована, зазначають архітектори. Так, таку станцію надзвичайно дорого будувати, це технічно складно, але все ж таки можливо з урахуванням темпів удосконалення технологій та інженерії.

Проект Open Lunar Foundation «Комуна на Місяці»

Неурядова організація «Open Lunar Foundation» заявили про розробку технології проживання на супутнику Землі і створення місячної колонії [8, 9]. Засновники фонду Open Lunar - Крис Хэтфилд, астронавт, Уилл Маршалл і Роббі Шинглер, засновники компанії, які виробляють супутники, і Саймон Уорден, колишній директор Дослідницького центру Еймса.

Колонії на Місяці. Реальне майбутнє або фантазії мільярдерів?

Сьогодні багато хто в США задаються питанням: «Чому до сьогодні не колонізували космос?». Після програми «Аполлон», були очікування, що NASA чи міжнародні космічні сили працюватимуть над космічними базами у реальному житті. Понад чотири десятиліття все ще чекають «місячну базу Альфа». Колишні астронавти, заповзятливі мрійники або мрійливі підприємці, вони зберігають мрію про місячну колонію. Сьогодні завдяки злиттю технологій, грошей та політичних інтересів ця ідея може вийти за межі наукової фантастики ближче до реальності».

Вивчення фахівцями цієї проблематики (на міжнародному рівні) показало, що є неофіційний план, який формується для колонізації Місяця [10].

По-перше, приватні космічні компанії шукають способи зменшити витрати на запуск. Потім з'являться літаючі та орбітальні платформи. Китайці планують запустити орбітальну космічну станцію до 2020 року, тоді як NASA звернулося до приватних компаній із пропозицією розробити місячну орбітальну платформу-шлюз біля Місяця до 2022 року. Вона може стати стартовим майданчиком NASA для майбутніх експедицій та поселень, як на Місяці, так і на Марсі.

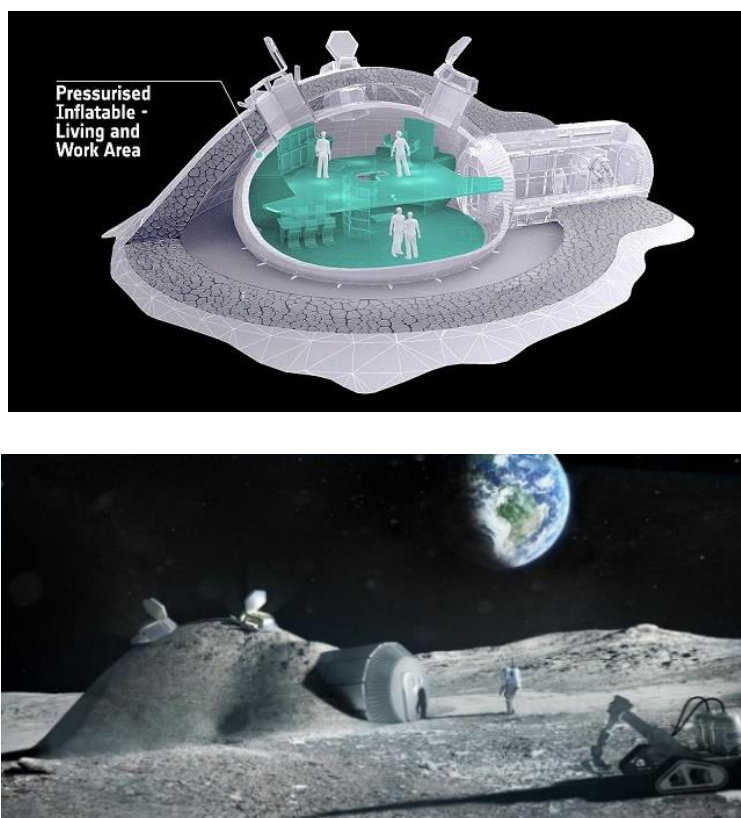


Рис. 1.10. Концепція Open Lunar Foundation «Комуна на Місяці».

У той же час, приватні фірми на кшталт Moon Express, так само як і Китайська, Індійська та Європейська космічні агенції рухаються вперед з роботизованими посадочними модулями та роверами. Кінцевим кроком, кажуть прихильники, буде постійна присутність людей на поверхні Місяця. Можливо, спершу з'явиться урядова база, а потім приватний готель на Місяці. Залучення NASA в місячні плани - це ключ до того, щоб дозволити приватним компаніям будуватися на поверхні Місяця. Для цього знадобиться кілька десятиліть.

Задачі освоєння Місяця. Прихильники колонізації Місяця вважають, що місячна база дозволить нам краще зрозуміти, як досягти далеких меж

Сонячної системи. Розвиток космічного туризму. Крім того, на Місяці можна видобувати цінні ресурси. Деякі дослідники з Китаю та Європи вважають, що на її поверхні містяться великі запаси гелію-3, рідкісного елемента, який можна використовувати як майбутнє джерело енергії для заправки ракет, що вирушають із Землі далі в космос.



Рис. 1.11. Концепція місячної колонії, НАСА.



Рис. 1.12. Концептуальні проекти місячних поселень, НАСА.

Економіка. Щоб місячна база працювала, їй потрібна економічна основа. У США вже назріває економіка «низької навколоземної орбіти» (ННО), серед тих, які виводять супутники в космос, обслуговують їх та готуються будувати місця для людей, які житимуть та працюватимуть на орбіті Землі. Економіка НГО зростає. SpaceX вартістю 28 мільярдів доларів — справжній гігант комерційної космічної галузі, і голова корпорації Ілон Маск планує запустити констеляцію супутників на ННО, відправити людей до Місяця і заснувати базу на Марсі.

Учасники місячних програм. Перехід від НОО-економіки до місячної економіки є цілком реальним сценарієм, вважає Джеффри Манбер, CEO Nanoracks, х'юстонської компанії, яка керує власною космічною лабораторією на МКС і запускає 10-дюймові кубсати для комерційних та університетських клієнтів з МКС.

Bigelow Aerospace, стартап космічних технологій, побудував надувний робочий модуль для астронавтів на космічній станції у 2016 році та планує вивести на орбіту Місяця ще один до 2022 року.

Бігелоу — один із кількох мільярдерів, які беруть участь у гонці за Місяць, серед Джеффа Безоса та його Blue Origin, Маска та його SpaceX, Річарда Бренсона та його Virgin Galactic.

Blue Origin розробляє посадковий модуль Blue Moon, який зможе переносити вантаж на місячну поверхню для майбутньої бази і ракети New Glenn, яка пройшла успішні випробування.

Китай розробляє роботи для освоєння Місяця. Китай також планує запустити посадковий апарат і велосипед на далеку сторону Місяця. Лідери країни також говорили про те, щоб поставити космонавтів на Місяць до 2036 року. Вони просувають технології вперед і роблять програми освоєння Місяця реальними.

Місячне місто. Туристи і промислове освоєння Місяця.

Японія, поряд з іншими провідними країнами, будує сміливі плани з освоєння Місяця і навіть збирається до 2040 заснувати там ціле місто з населенням в 10 000 чоловік [11].

Японська компанія Ispace планує запуск орбітального апарату Nakuto-R та дослідження місячної поверхні за допомогою місяцеходів. У місячному місті під назвою «Місячна долина», крім науково-дослідних об'єктів, будуть розміщені промислові модулі, а також об'єкти туристичної сфери. Більше того, японська компанія планує вести видобуток кисню та водню із місячного льоду.

Промислове освоєння Місяця обіцяє відкрити перед землянами грандіозні можливості. Тут є цінні корисні копалини, такі як залізо, титан та запаси ізотопу гелій-3. Останній особливо цікавий з точки зору застосування як паливо для термоядерних електростанцій.



Рис. 1.13. Проект місячного міста на 10 тис. чол. «Місячна долина», Ispace.

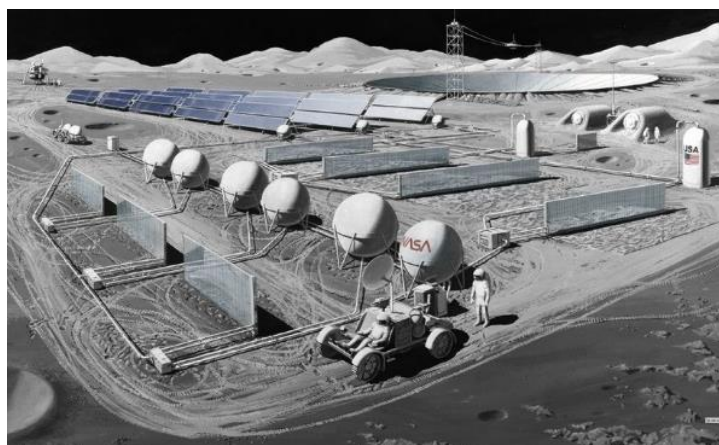


Рис. 1.14. Промислові модулі і туристичний об'єкт в місті на Місяці «Місячна долина», Ispace.

Концепція місячного поселення Інституту космічних досліджень РАН

Перша місія російських космонавтів на Місяць планується в 2026-2031 роках і буде тривати один - два тижні. Про це, у 2016 р., заявив завідувач лабораторії космічної гамма-спектроскопії Інституту космічних досліджень РАН Митрофанов І. [12]. Місія буде здійснена у кілька етапів.



Рис. 1.15. Концепція поселення роботів-автоматів «Полігон»

Перший етап – створення «поселення» роботів-автоматів під назвою «Полігон» в одному з полярних районів Місяця.

Другий етап – створення інфраструктури місячної бази у районі Полігона. Зокрема, створення модуля із захистом від космічного випромінювання та системою життєзабезпечення на основі наявних на Місяці ресурсів. Під час першої висадки космонавти перебуватимуть у цьому "поселенні" протягом одного місячного полярного дня. Більш тривала експедиція може тривати місяць. До здійснення тривалої експедиції російські космонавти управлятимуть роботами на Місяці, перебуваючи на навколомісячній орбіті в кораблі.

Проект місячного поселення ФГУП «Конструкторське бюро загального машинобудівництва імені В.П. Барміна»

Наприкінці 1960-х — на початок 1970-х років у Радянському Союзі велися роботи над проектом створення довготривалого місячного поселення (МП). Головною організацією розробки цього проекту стало

Конструкторське бюро загального машинобудування. Ідея розробки місячного поселення належить Корольову С. П. [13].

Створення такого великого космічного об'єкта планувалося на вирішення низки наукових і прикладних завдань.

По-перше, передбачалося проводити дослідження самого Місяця, вивчення його природних ресурсів та можливості їх використання на користь людини.

По-друге, здійснення проекту дозволило б вести з Місяця постійний моніторинг Землі на користь метеорології, сільського господарства з метою виявлення катастроф тощо. При цьому можна було б спостерігати цілу півкулю, що недоступно при нинішньому моніторингу з супутників. По-третє, з Місяця завдяки відсутності в неї атмосфери могли проводитися дослідження далекого космосу, недоступні для земної астрономії. По-четверте. Місяць у майбутньому міг би стати полігоном для відпрацювання космічної техніки, підготовки екіпажів та проміжною базою для далеких космічних експедицій.

Вихідні дані для розробки проекту. МП має бути побудовано на видимому боці Місяця та розраховане, при повному розгортанні, на екіпаж космонавтів чисельністю 12 осіб. Тривалість активного функціонування МП – до 5 років. Розгортання ЛП відбувається поетапно. Мінімальна чисельність екіпажу – 4 особи. Час перебування кожного члена екіпажу на Місяці – до одного року.

Коло проблем, вирішуваних під час створення та експлуатації місячних споруд. Будівництво об'єктів на Місяці, конструкції та архітектура місячних споруд. Розробка системи життєзабезпечення, енергоживлення, зв'язку, збирання та зберігання інформації. Проектування місячних машин та механізмів. Дослідження питання про отримання кисню та води з місячних порід. Створення програми досліджень, які мають проводитися персоналом місячного поселення.

Структура МП. Місячне поселення входить до складу місячного комплексу як основна центральна його ланка. Крім МП, місячний комплекс повинен включати мережу розміщених по всій поверхні Місяця автоматичних стаціонарних наукових станцій, штучних супутників Місяця наукового і прикладного призначення, а також автоматичні пересувні наукові станції типу «Місяцехід». З місячним комплексом взаємодіє наземний командний комплекс, і навіть транспортна космічна система «Земля — Місяць». МП служить основним місцем перебування людей, центром управління та зв'язку, лабораторією попередньої обробки та аналізу результатів досліджень, базою зберігання та технічного обслуговування обладнання.

Склад МП:

- комплекс основної споруди (місце постійного перебування членів екіпажу МП, тому тут забезпечуються повний захист людей від дії несприятливих факторів місячного середовища та найбільш комфортні та звичні умови життя);

- споруди науково-дослідного комплексу (що включає обсерваторію, геофізичну станцію з установкою для надглибокого буріння);
- енергоцентр;
- транспортні засоби, які можуть об'єднуватися в автопоїзд;
- місячний космодром;
- установки для отримання кисню та води з місячного ґрунту.

У проекті місячного поселення велика увага приділялася інтер'єрам, адже люди мали жити і працювати в замкнутому обсязі роки (Рис.16).

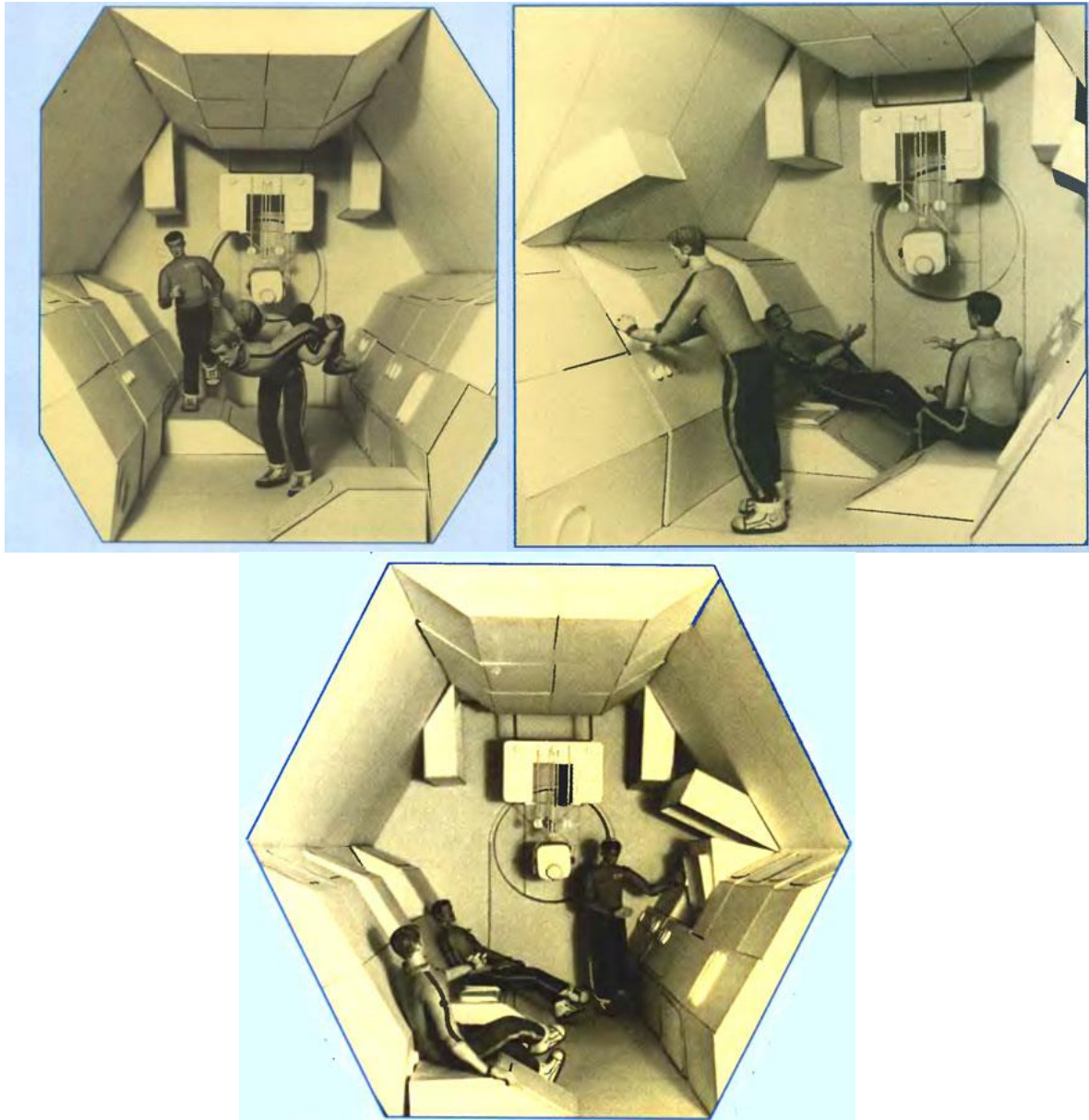


Рис. 1.16. Макети трансформації інтер'єра житлового блока місячної бази, МАРХІ

Шестигранне приміщення повертається навколо горизонтальної осі та фіксується в одному з трьох положень: кімната відпочинку, кухня-їдальня, спортзал.

Основна споруда. Конструкція ОС повинна бути герметична, мати теплоізоляцію та захищати людей та обладнання від космічної радіації та метеорних частинок. Головні проблеми полягали в тому, щоб забезпечити максимальну живучість основної споруди, мінімізувати трудовитрати при її будівництві та дотримуватися обмежень, пов'язаних із транспортуванням із Землі. Тому було прийнято модульну схему побудови: вся споруда збирається з окремих блоків (модулів), кожен із яких є автономним елементом конструкції.

Це дає такі переваги:

- кожен модуль являє собою герметичну комірку, завдяки чому виходить природний поділ усієї споруди на окремі, ізольовані один від одного зони і тим самим забезпечується підвищення його живучості;
- за модульною схемою споруда легко членується на транспортні партії;
- модульна схема дозволяє розбити будівництво на окремі етапи, а при необхідності - добудовувати споруду (Рис. 1.17).



Рис. 1.17. Модульна конструкція основної споруди місячної бази, МАРХІ

Захист людей та обладнання від дії космічної радіації та метеоритів доцільно забезпечити засипкою споруди місячним ґрунтом (реголітом). Як показали розрахунки, надійний захист забезпечить шар товщиною 30 – 40 см.

Для зручності транспортування модулів на Місяць було розроблено так звану конструкцію, що трансформується, запропонована Інститутом електрозварювання імені Є.О. Патона. Вона є циліндром, складеним гармошкою. Трансформація таких конструкцій здійснюється за рахунок подачі в їх внутрішні порожнини надлишкового тиску (достатньо робочого тиску, що підтримується у приміщеннях основної споруди). У транспортному положенні модуль мав довжину 4,5 м-коду, а після доставки на місце будівництва вона збільшувалася до 8,6 м-коду.

Етапи створення МП:

1 етап-екіпаж 4 чоловіки – три модуля;

2 етап – екіпаж – 8 чоловік, 6 модулів;

3 етап - 9 модулів, 12 чоловік екіпажу.

Споруда має дві шлюзові камери, розташовані в протилежних кінцях. Вони забезпечують одночасний вихід чотирьох космонавтів через кожну камеру. У шлюзовій камері є майстерня для ремонту техніки, наукових приладів та скафандрів. У житлових модулях 12 індивідуальних кают (2 м²). В каютах є крісло-ліжко, відкидний стіл, шафа для особистих речей. Біля кожної каюти зберігається резервний скафандр у разі аварійної ситуації. Є туалети та душові. Тут же розміщено основні блоки системи забезпечення життєдіяльності. Кухня (7,5 м²), їдальня і вона ж кают-компанія (13,5 м²) займають весь модуль. Тут же зберігаються запаси зневоднених та заморожених продуктів.

В окремих модулях розташовано: основний командний пункт МП; медичний пункт та приміщення для заняття фізкультурою. Тут розміщується резервний командний пункт; 2 модулі відведені для наукових лабораторій.

Основна споруда оснащена системою життєзабезпечення, до складу якої входять підсистема регенерації атмосфери, підсистема водозабезпечення, що здійснює регенерацію рідких відходів людини, підсистема обробки та видалення твердих відходів, підсистема санітарно-гігієнічного забезпечення, підсистема зберігання та приготування їжі. До складу системи життєзабезпечення входить також фітотрон (оранжерея), який одночасно є засобом психологічного розвантаження членів екіпажу.

Транспортні засоби використовуються на всіх етапах створення та експлуатації МП. З їхньою допомогою вибирається місце будівництва, доставляються вантажі, ведеться монтаж споруд місячного комплексу, здійснюються наукові експедиції.

До складу транспортних засобів МП входять: важкий місяцехід, пересувне укриття, візок-причіп, кран, енергетичний пересувний блок. Автопоїзд, до складу якого входять важкий місяцехід, пересувне укриття, пересувна енергетична установка та візок-причіп, призначений для

здійснення далеких поїздок Місяцем та проведення досліджень (переважно геологічних та геофізичних). На візку-причепі при таких поїздках розміщується бурова установка. Крім того, у вибраних місцях космонавти розміщуватимуть автоматичні наукові станції, інформація від яких передається на Землю радіоканалом. Як основне джерело енергоживлення при далеких поїздках передбачається використовувати радіоізотопну термоемісійну установку.

Система електропостачання МП. Довга місячна ніч (14 земних діб) практично виключає можливість використовувати Сонце як основне джерело енергії МП. Як основне джерело електропостачання МП доцільно використовувати два ядерні термоемісійні реактори-перетворювачі, об'єднаних в єдину установку. Як основне джерело енергії на початковому етапі будівництва МП, а також в автопоїзді при здійсненні експедицій по Місяцю доцільно використовувати пересувний енергетичний модуль, виконаний на базі радіоізотопних термоемісійних генераторів. Аварійними джерелами електропостачання в спорудах та агрегатах МП можуть бути срібно-цинкові акумуляторні батареї.

Кисневидобувна установка призначена для отримання води та кисню з місячних порід з метою компенсації непоправних втрат цих компонентів при експлуатації МП. Технологічний процес отримання води, що реалізується в ній, заснований на відновленні за допомогою водню окису заліза, який у значних кількостях міститься в місячному реголіті. Процес відбувається за нормальної температури близько 700°C. Далі вода шляхом електролізу розкладається на кисень, що прямує для потреб МП, та водень, який повертається для відновлення нової порції окису заліза. При реалізації такого процесу з місячного реголіту можна добувати до 8% (вагових) кисню.

Етапи створення МП:

- дослідження на вибір місця розміщення МП на видимій поверхні Місяця. Передбачалося, що це стик рівнинної та гірської частин, для зручного проведення геологічних та геофізичних досліджень обох типів місячного рельєфу;

- рекогносцирувальні роботи, включаючи буріння ґрунту на глибину до 3 м за допомогою автоматичного місяцехода;

- доставка вантажів для початку першого етапу будівництва МП. До складу цих вантажів входили три блоки модулів основної споруди, важкий місяцехід, пересувне укриття, вантажний візок із навісним обладнанням, пересувна енергоустановка та науково-дослідне обладнання;

- відправка на Місяць першого екіпажу з 4 космонавтів-будівельників. Вони мали приготувати місце для будівництва основної споруди, розвантажити транспортні кораблі та перемістити вантажі до місця будівництва. У цих роботах використовувалися б важкий місяцехід, навісне обладнання до нього, кран та транспортний візок.

Розробки, виконані 30 років тому, зараз багато в чому здаються найвнішими, але це був перший крок, який окреслив напрямок подальшого руху.

Проект місячної бази зі штучно створеною гравітацією

Проект місячної бази зі штучно створеною гравітацією пропонував інженер Майборода А. Його стаття була опублікована у журналі «Повітряно-космічна сфера» [14].

Основна мета проекту - створення умов довгострокового перебування на природному супутнику Місяць. Згідно з наявними моделями перебування людини на Місяці, він зможе перебувати на Місяці до шести місяців. Більше організм може витримати. Якщо від сонячного та галактичного випромінювання його можуть там врятувати будівлі з 5-метрового шару ґрунту-реголіту, то тривалий час без земного тяжіння може призвести до серйозних проблем. Тобто людині доведеться періодично повертатись на Землю, що дуже дорого.

Основне завдання проекту – забезпечення періодичної профілактичної релаксації екіпажів у спеціальних станціях-центрифугах, що моделюють земне тяжіння, за тривалого перебування на Місяці.

Новизна проектного рішення - створення санаторію із земними умовами, де екіпажі періодично виявлялися б в умовах земної гравітації для відновлення здоров'я, для релаксації.

Планування та конструктивне рішення «санаторію» зі штучно створеною гравітацією. Форма – коло (тор). Діаметр 500 м. Спорудження з найтоншої листової сталі або титанового сплаву (9-15 тонн). Сучасні композитні матеріали – 2 тонни. У трубі тора розміщуються 8-метрові житлові вагончики-капсули (модулі). Тор захищають насипом з реголіту для захисту від радіації та метеоритів. Житлові вагончики-капсули повинні рухатися зі швидкістю 168 км/год для створення земного тяжіння. Електрична обмотка вагонів забезпечить магнітне поле, схоже із земним.

Час перебування у центрифугі. Люди можуть там постійно перебувати, керуючи роботами-місяцеходами по телеметрії. Варіант 2 - 6-8-годинний режим роботи на поверхні Місяця з наступним переходом до центрифуги для відпочинку, їди та ночівлі. Якщо люди зможуть проводити по 16–20 годин на добу за нормальних умов, вони зможуть жити там роками і навіть народжувати та ростити дітей.

Енергозабезпечення та розташування «санаторію» - тора. Розташування на екваторі – атомна міні-електростанція. Розташування в районі місячного полюса (ніч триває два тижні на рік) – сонячна енергія.

Схема тороїдальної центрифуги з пневматичною колійною структурою: 1 – житловий модуль (діаметр 3,2 м); 2 - колійна структура у вигляді газонаповненої тонкостінної труби (діаметр 4,5 м); 3 - антирадіаційний екран у вигляді насипу реголіту (довжина 1407 м); 4 –

колесо модуля; 5 - частина пневмоконструкції, що виконує функцію опорної поверхні колеса модуля; 6 - ровери (місяцеходи) для виконання робіт з вирівнювання ложа колійної структури та засипання реголітом тороїдальної центрифуги причіпним ґрунтометом.

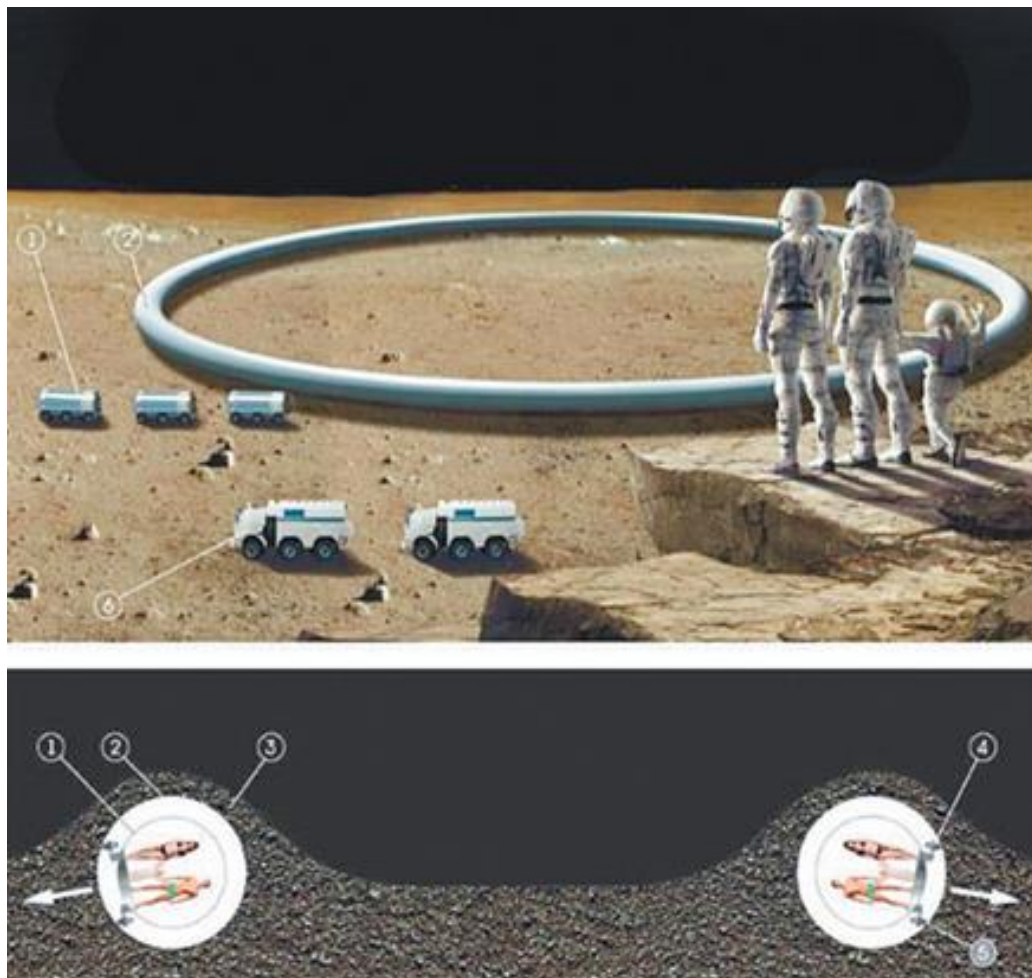


Рис. 1.18. Проект місячної бази зі штучно створеною гравітацією.

1.3. Архітектурні концепції

MOONTOPIA – архітектурний конкурс по освоєнню поверхні Місяця

2016 року пройшов міжнародний архітектурний конкурс MOONTOPIA. Перед авторами стояло завдання створити проект споруди, придатної для житла, роботи та проведення наукових досліджень. За результатами, представленими журі, до складу якого входили співробітники NASA, серед сотень запропонованих проектів було відібрано 10. Основним чинником для створення проектів було пристосування майбутніх будівель до умов, що існують на Місяці. Тому до

вибору матеріалу, форми та загального плану конструкції авторам необхідно було поставитись серйозно. На перший погляд, результати творів нагадують фантастичні фільми про космос, вражають масштабністю, переважанням футуристичного стилю, проте видно, що передумовами все ж таки стали риси сучасної архітектури – максимум скління, органічні форми.

Проект «WOMB» - наймінімалістичніший проект конкурсу [15]. Автори: Prapatsorn Sukkaset, Saran Chamroonkul. Концепція полягає в тому, що люди, які живуть на Місяці, знайдуть там притулок від матеріалістичного життя на Землі, де їхня свідомість завантажена зайвими декораціями та деталями.

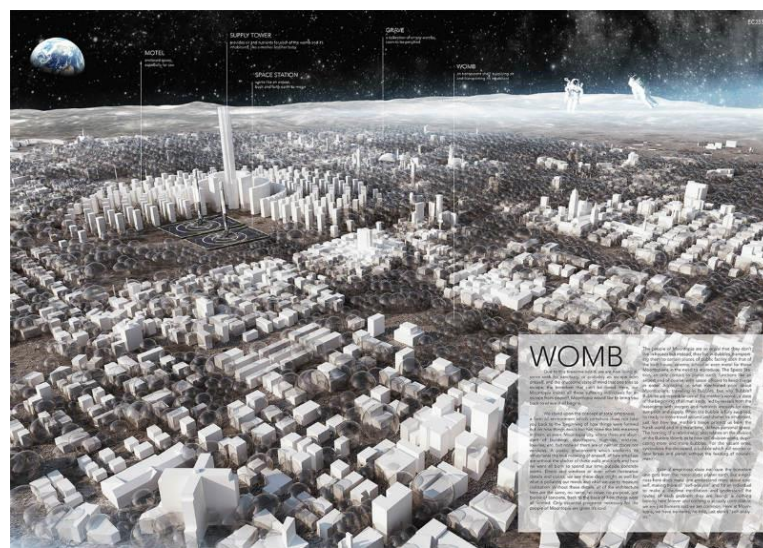


Рис. 1.19. Концепція місячного поселення «WOMB»

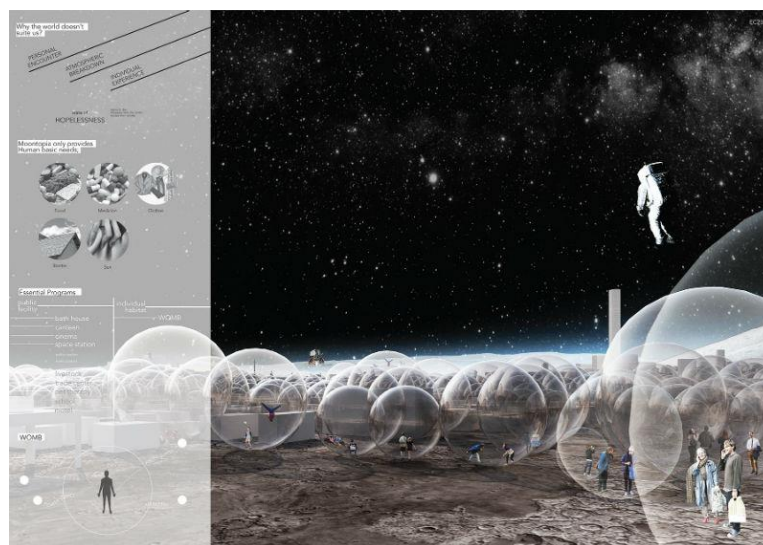


Рис. 1.20. Фрагмент місячного поселення «WOMB». Проект.

Ні дверей, ні вікон, ні кольору – лише білі бетонні блоки, що повертають до думки, як зароджується форма. Люди почуватимуться вільно, перебуваючи в бульбашках, які з одного боку нагадують клітини будь-якого організму, з іншого боку – утробу матері, що символізує безпеку.

Проект «LOOKING THROUGH THE MOON EYE». Автори: Yiling Chu, Yao Ding, Yan-Fei Jiang, Hui Tian [15]. В його основу лягла ідея про пристосування до особливостей будови Місяця – її кратерів, діаметр яких варіюється від кількох сотень кілометрів. Створення бази всередині кратера забезпечить безпеку, а також можливість бути ближче до води, яка, як передбачається, може бути виявлена в кратерах. Параболічна форма, що покриває кратер згори, забезпечить хороший огляд для телескопів і дозволить збільшити їх діаметр, щоб спостерігати за іншими тілами Всесвіту, вивчати чорні дірки та шукати інші цивілізації. Щоб уникнути попадання астероїдів у подібну конструкцію в кратерах будуть розміщені лазери, які руйнуватимуть об'єкти, що летять, на далеких відстанях.

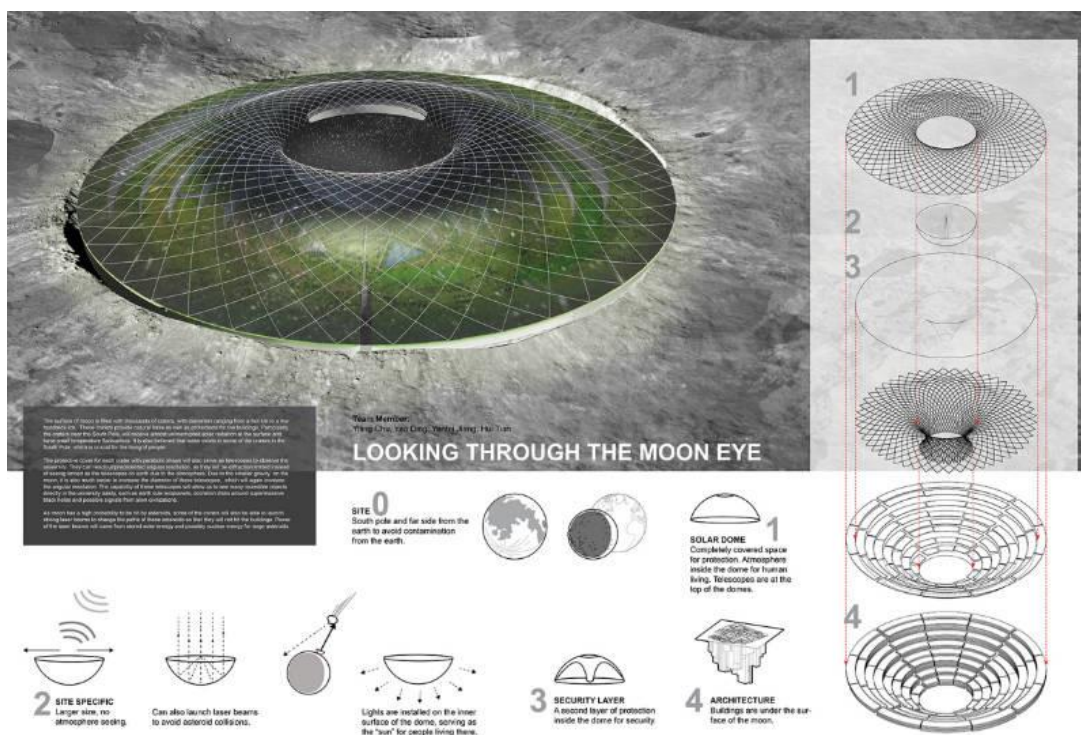


Рис. 1.21а. Місячне поселення в кратері. Загальний вигляд.
Проект «LOOKING THROUGH THE MOON EYE»

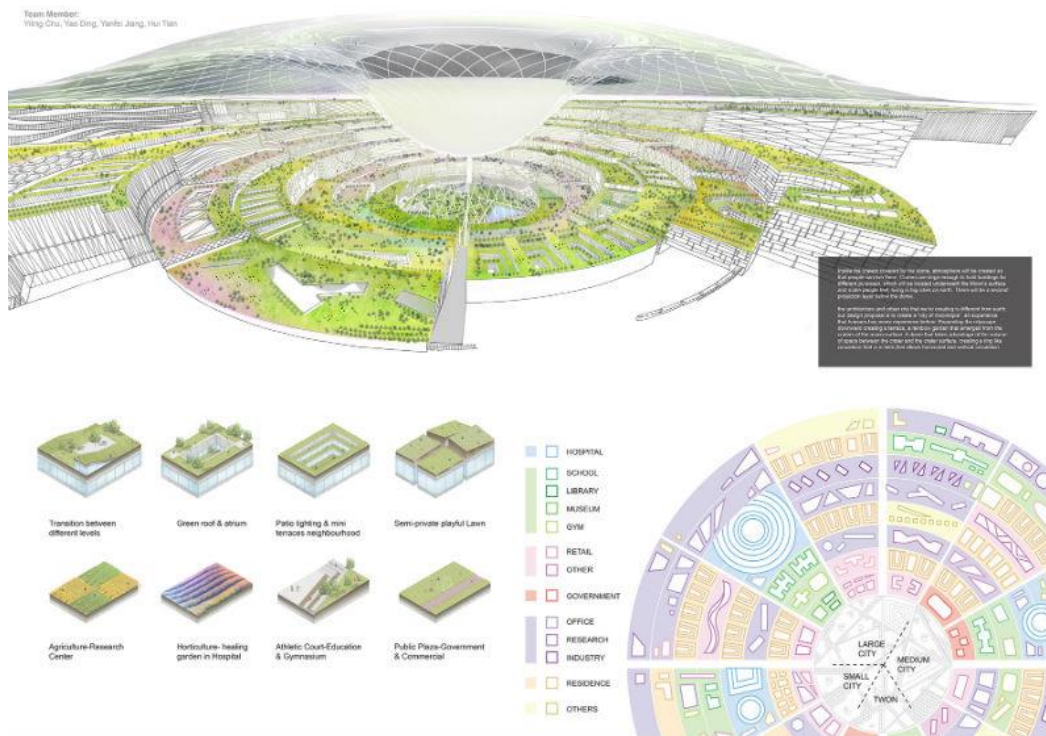


Рис. 1.216. Місячне поселення в кратері. План, розріз. Проект «LOOKING THROUGH THE MOON EYE».

Проект «PLATINUM CITY» – один із наймасштабніших проектів, що передбачає будівництво цілого мегаполісу з розвинуеною інфраструктурою, розрахованого на 3000 жителів. Автор: Sean Thomas Allen [15].

В основі концепту лежить ідея про видобування та переробку астероїдів у корисні ресурси, а також про космічний туризм. Зовні план міста нагадує збільшену в кілька разів будову клітини живого організму. Це доводить - людина прагне створити подобу живої природи у нових сучасних проектах архітектури навіть на Місяці.

Проект «LUNAR OASIS». *Lunar Oasis, автор: Edward Chew* [15].

Один із конкурсанти вирішив піти далі за всіх і розробити призначений для життя людей на Місяці через 140 років після першої висадки людини у 2110 році. Це буде вже третя хвиля колонізації та вдосконалення будівель саме через призму архітектурних особливостей, а не з погляду придатності для існування, яка до вказаного моменту часу вже буде доведена до досконалості.

ПРОЕКТ «MODULPIA». *Автори: Alessandro Giorgi, Cai Feng, Siyuan Pan Esteban Analuiza* [15]. Основна ідея - простота, економічність та максимальна придатність.



Рис. 1.22. Місячний мегаполіс на 3000 жителів. Проект «PLATINUM CITY»

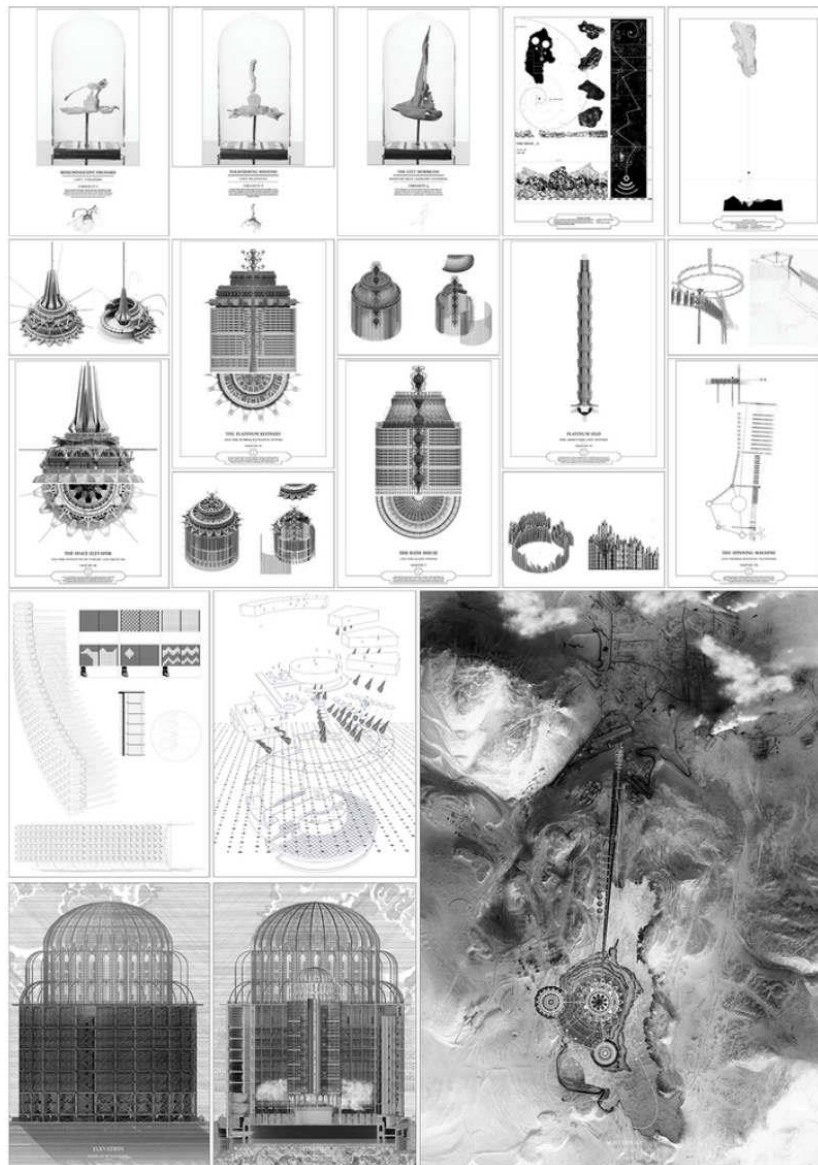


Рис. 1.23. Концепція біоного місячного мегаполіса. Проект «PLATINUM CITY».

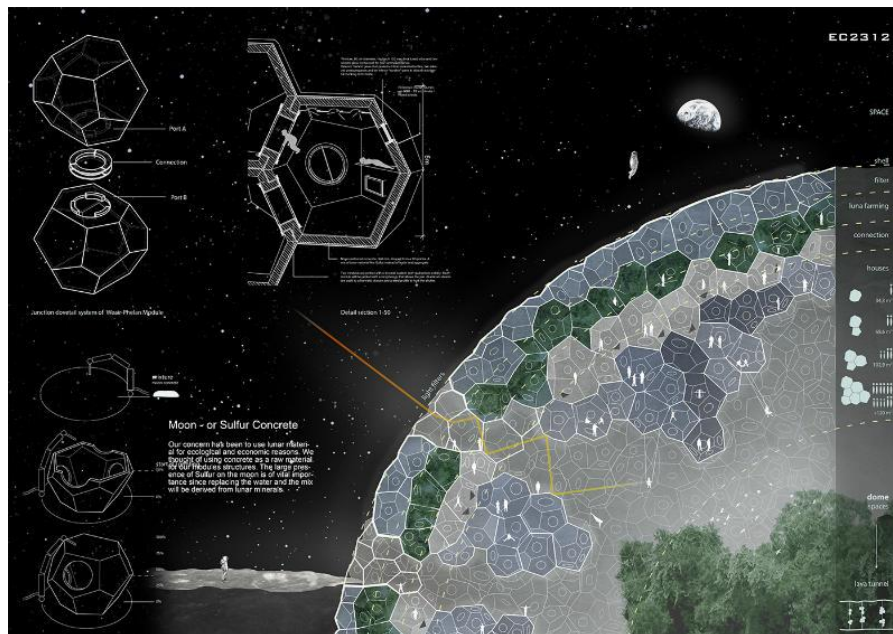
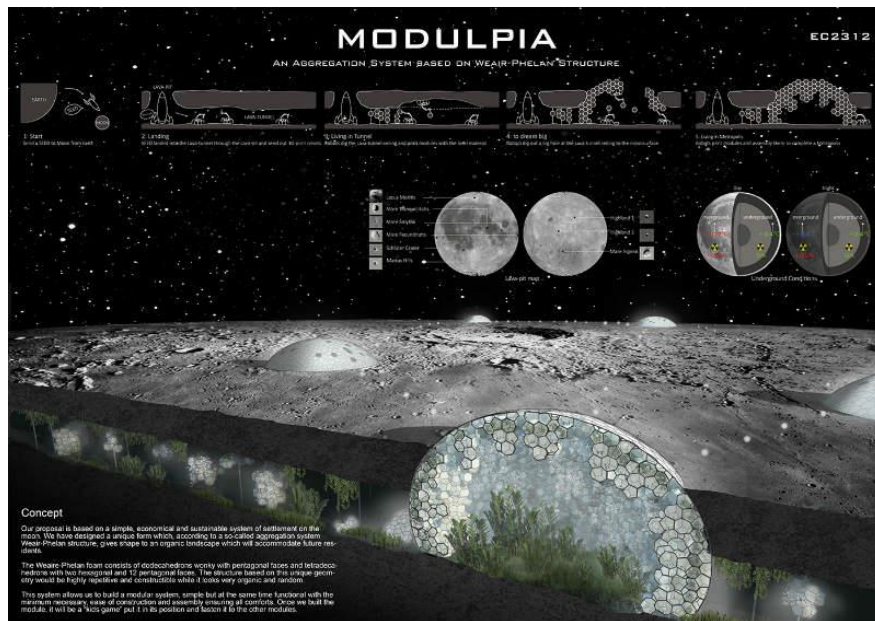


Рис. 1.25. Концепція ергономічного поселення на Місяці.
Проект «MODULPIA».

Проект «UPSIDE DOWN». Автори: *Ryan Tung Wai Yin, Ho Wing Tsit, Teresina, Joshua Ho* [15]. Ідея розрахована на кілька сотень років уперед, оскільки, за задумом авторів, Місяць стане тимчасовою базою проживання людини. Супутник буде використаний як полігон для збору досвіду та ресурсів, щоб надалі людина могла перебратися на Марс. Місцем проживання для людей стане навіть не сам Місяць, а монотрек, що його оперізує.

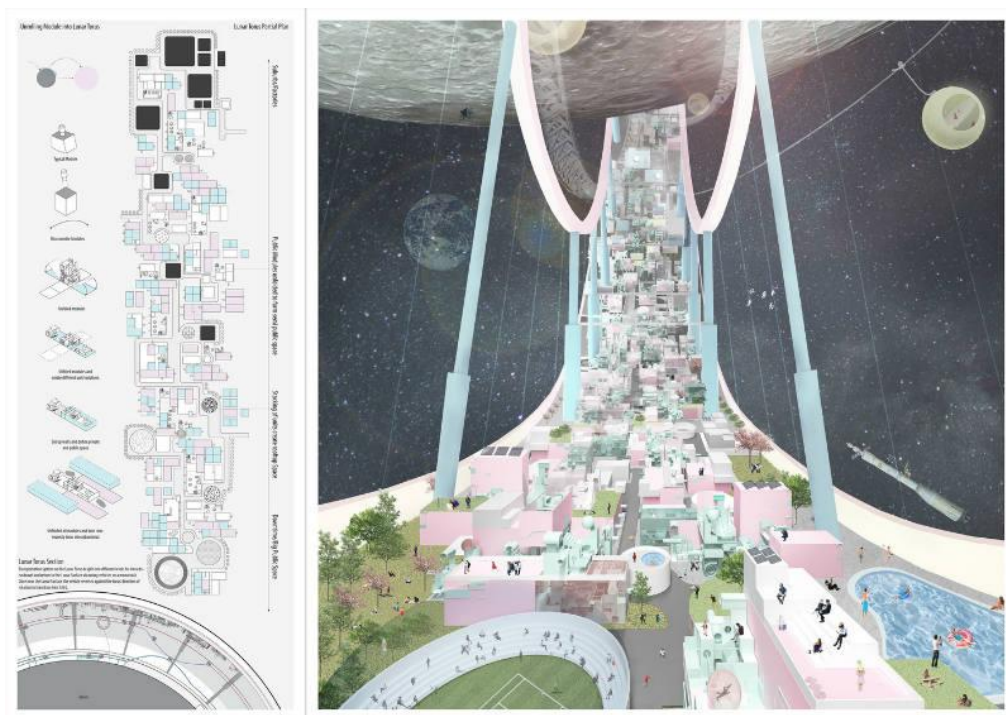


Рис. 1.26. Концепція місячного Монотрека.
Проект «UPSIDE DOWN»

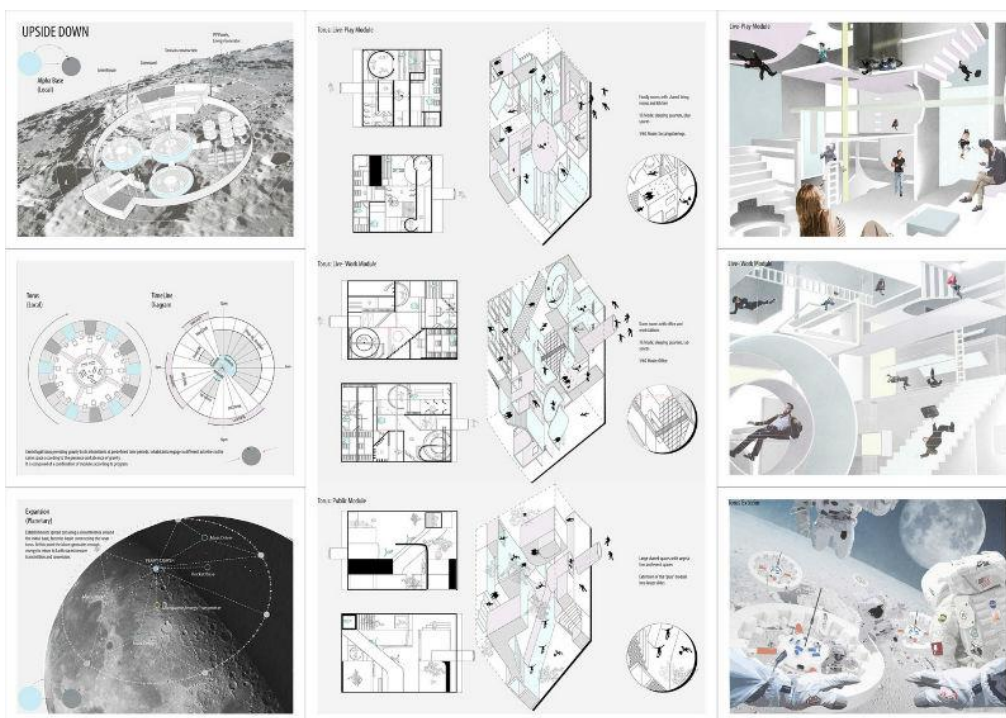


Рис. 1.27. Концепція місячного Монотрека. Середовище проживання.
Проект «UPSIDE DOWN»

Проект «MOMENTUM VIRIUM». *Автори: Sergio Bianchi, Jonghak Kim, Simone Fracasso, Alejandro Jorge Velazco Ramirez* [15]. Основна ідея - дослідження та проживання на Місяці без будь-яких її пошкоджень. Замість того, щоб будувати безпосередньо на поверхні супутника, автори вирішили створити окрему базу, з'єднану з Місяцем кабелем. Таким чином здійснюватиметься транспортування необхідних ресурсів та самих дослідників. Створення безпечної атмосфери дозволяє надалі застосовувати цей проект для освоєння та інших космічних об'єктів та планет.

Проект «TEST LAB». *Автори: Monika Lipinska, Laura Nadine Olivier, Inci Lize Ogun* [15]. Простий та реальний варіант освоєння Місяця. Капсули еліпсоїдної форми будуть створені за допомогою 3D-друку та зібрані вручну. Така технологія прискорить процес освоєння Місяця, проведення досліджень, а також розвитку туризму, який передбачає проект.

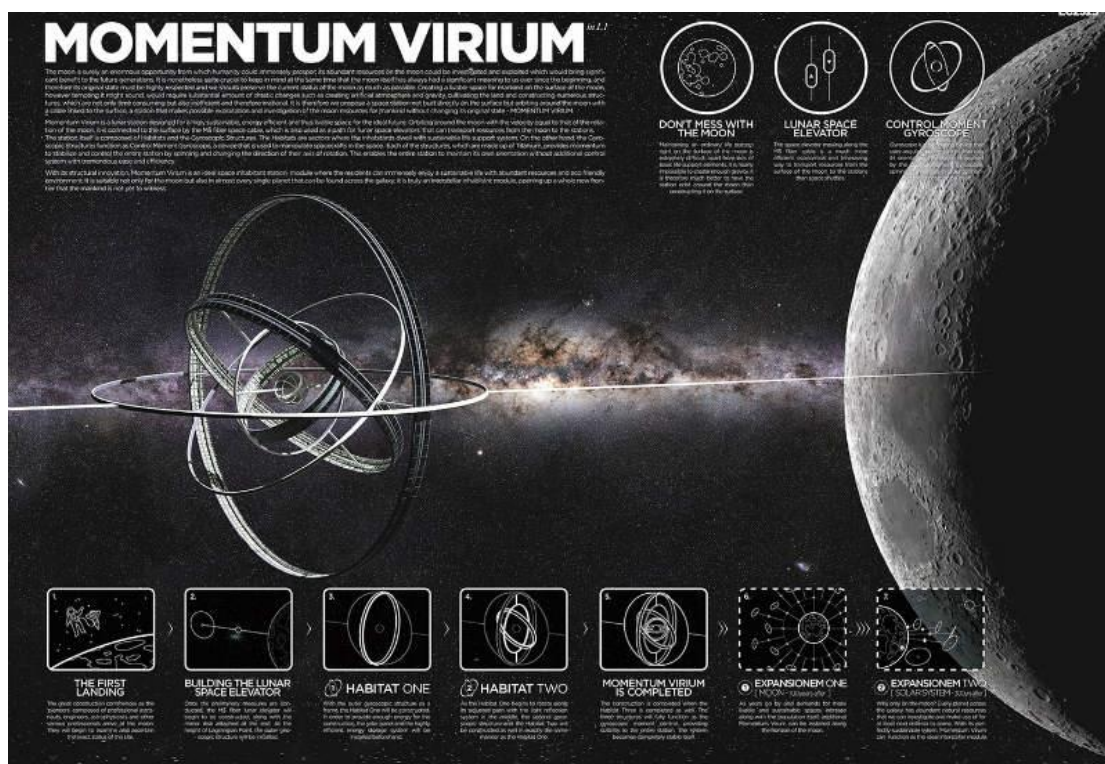


Рис. 1.28. Концепція поселення-спутника Місяця. Проект «MOMENTUM VIRIUM»

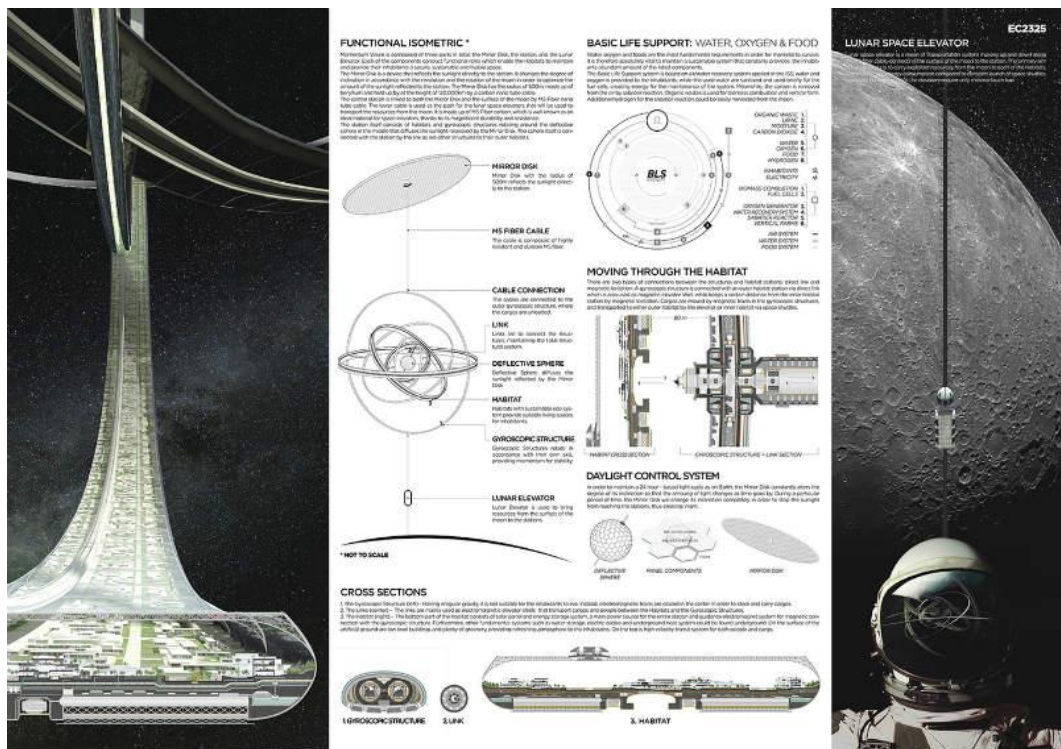
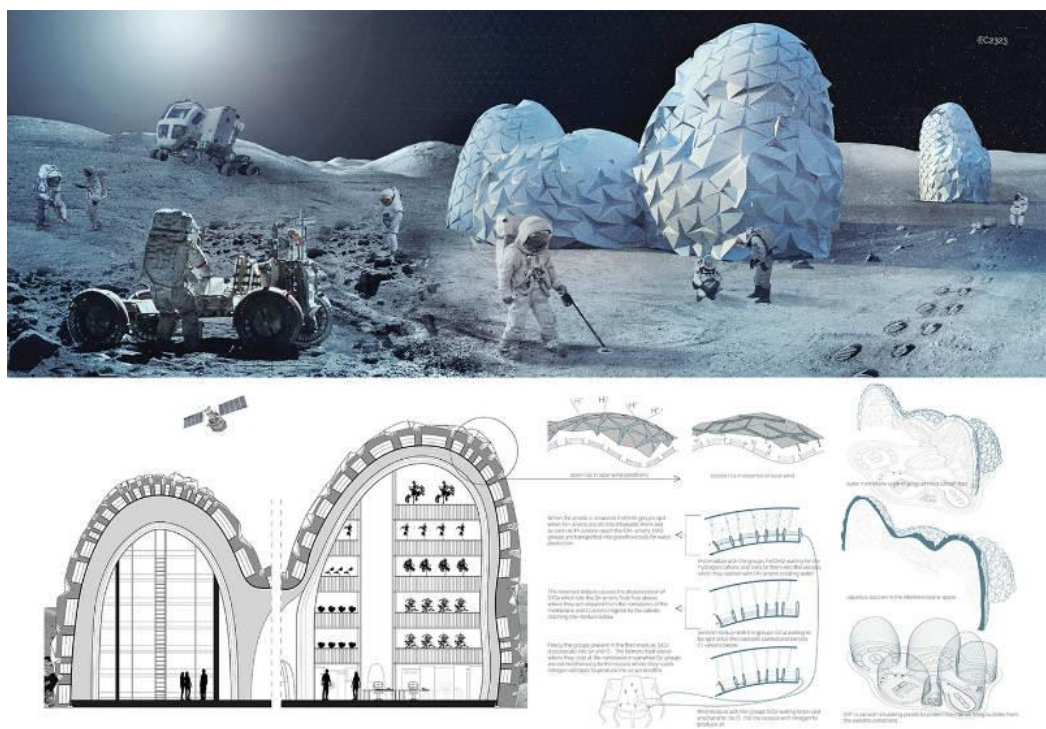


Рис. 1.29. Середовище проживання поселення-супутника Місяця.
Проект «MOMENTUM VIRIUM»



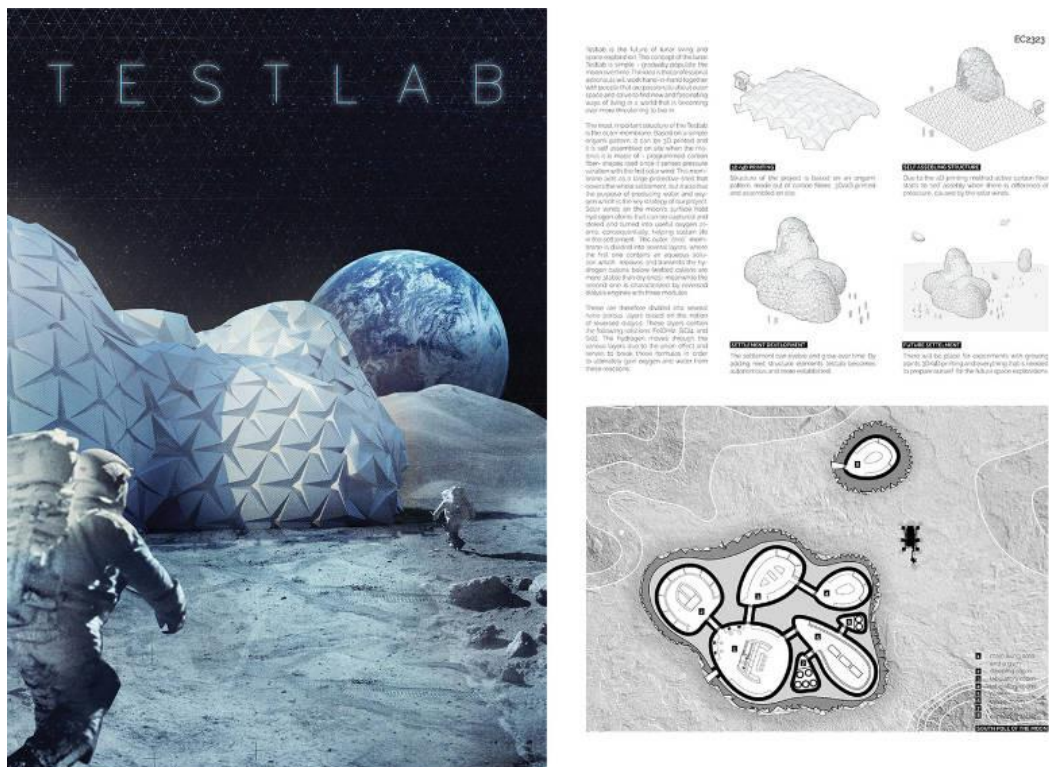


Рис. 1.30. Місячне житло – капсули еліпсоподібної форми будуть створені за допомогою 3D-друку. Проект «TEST LAB».

Подібні конкурси дають волю фантазії архітекторів та інженерів. Навіть якщо, освоєння Місяця - це далека перспектива, сьогодні можна застосовувати деякі ідеї для створення більш сприятливого проживання на Землі, щоб завдавати якнайменше шкоди тому місцю, де людство з'явилося.

1.4. Експериментальні архітектурно-конструктивні розробки місячних модулів

Захисний купол населеної станції на поверхні Місяця

Процес масштабного дослідження та освоєння Місяця розпочнеться зі створення на її поверхні швидкокомтованих станцій, які дозволять першим її мешканцям організувати та провести підготовчі заходи для створення постійної населеної бази на Місяці.

Групою вчених інституту астрономії РАН та Самарського державного технічного університету, вперше, як захисний будівельний елемент місячної населеної станції запропоновано конічну блочну купольну конструкцію та спосіб її зведення за допомогою пневматичної опалубки в природному поглибленні поверхні Місяця [16]. Як будівельний

матеріал для виготовлення блоків пропонується використовувати місячний реголіт, а як спосіб їх виготовлення - спікання реголіту в МВЧ-печі.

Незважаючи на простоту конструкцій перших місячних станцій, вони повинні надійно захищати перших колоністів від небезпек Місяця, основними з яких є вакуум, великі добові перепади температур, космічні промені та метеоритне бомбардування.

Характеристика та конструктивне рішення захисного бані станції. Автори пропонують для захисту від космічного випромінювання, перепадів температур та високошвидкісних ударів метеоритів масою до 350 грамів достатньо використовувати шар місячного ґрунту – реголіту завтовшки не менше чотирьох метрів.

Будівельна конструкція має бути міцною і простою у зведенні, що дозволило б роботизувати процес будівництва. Подібні будівельні конструкції можуть бути використані як захисні елементи для командно-житлових, складських та науково-дослідних модулів, що становлять інфраструктуру тимчасових місячних баз.

Купольна конструкція зводиться з окремих блоків, які, у свою чергу, передбачається виготовляти з поверхневого місячного ґрунту – реголіту. Опалубка для будівництва використовується надувна (пневматична).

Виготовлення будівельних блоків в умовах Місяця ефективніше проводити спіканням попередньо відформованого реголіту у НВЧ-печах або створення конструкцій мобільним 3D-принтером.

З метою подальшої автоматизації процесів виготовлення реголітових блоків та захисного купола авторським колективом було розроблено комп'ютерну програму на основі платформи Bootstrap, яка дозволяє розраховувати потребу блоків різної номенклатури залежно від габаритів. Такою програмою надалі можуть оснащуватися місячні будівельні роботи.

Усі роботи зі зведення захисної бані можуть виконувати автоматизовані роботи заздалегідь, до висадки космонавтів на Місяць. На зведення місячної бази з одним захисним куполом, здатним прийняти перші екіпажі, потрібно близько земного року.

Концепції структур місячної бази

У роботі «Огляд будов місячної бази: минуле та майбутнє» Хайм Бенаройя розглядає три етапи еволюційного розвитку концепції місячної бази за останні 50 років [17]:

- Концепція місячної бази в епоху «Аполлона»;
- сучасні концепції побудови місячної бази;
- футуристичні концепції побудови місячної бази.

Основними факторами середовища, що впливають на виживання людини на Місяці та типи місячних конструкцій, у тому числі формоутворення, дизайн та особливості будівництва місячної бази, є: атмосфера Місяця – вкрай розряджена оболонка; поверхня знаходиться у жорсткому вакуумі і, таким чином, уразлива для галактичних та сонячних

радіацій (сонячний вітер) та мікрометеоритів (падіння мікрометеоритів); гравітація (вік).

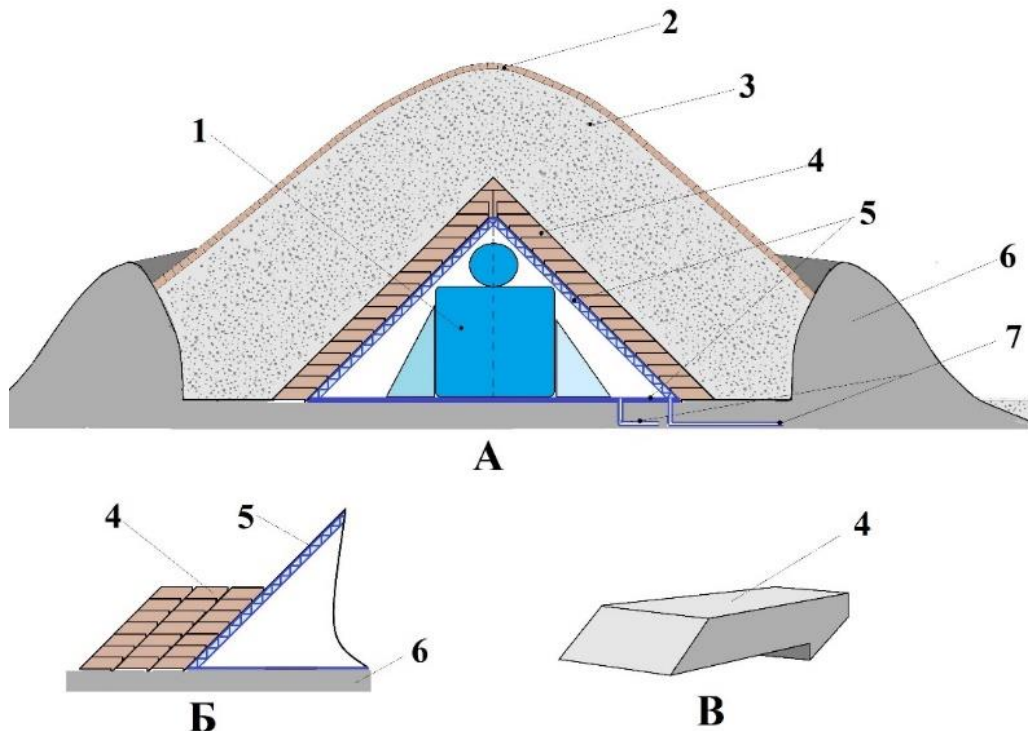


Рис. 1.31. Схеми устрою та розташування купольної конструкції в кратері або в поглибленні на поверхні Місяця (А), укладання блоків при зведенні конічної споруди в три блоки (Б), форма блоку (В), де цифрами вказані наступні конструктивні елементи [16]:

1 – житловий модуль; 2 – шар реголітових блоків на захисному шарі з реголіту; 3 – захисний шар реголіту; 4 – реголітові блоки; 5 – надувна опалубка; 6 – місячний кратер; 7 – труби для надування пневмоопалубки

Як зазначає Хайм Бенарой, за останні десятиліття запропоновано низку універсальних конструктивних рішень місячної бази. До них відносяться бетонні конструкції, конструкції з металевого каркасу, пневматичні конструкції та гібридні конструкції. А також розробляються варіанти для підземних споруд та використання природних об'єктів, таких як лавові труби.

Будь-яка місячна конструкція повинна проектуватися та будуватися з урахуванням наступних умов та вимог:

- безпека та надійність: безпека людини та мінімізація ризику (особлива міцність конструкції, додаткові навантаження, швидка евакуація);
- наддув повітря всередині: місячна структура є закритим середовищем життєзабезпечення. Це герметичний закритий об'єм із

внутрішнім тиском, що забезпечує захист від катастрофічних декомпресій, викликаних випадковими та природними впливами;

- екранування: першочергова увага до розробки конструкції-щита проти небезпечної зовнішньої дії (суцільне сонячне/космічне випромінювання, метеоритні удари, екстремальні показники температур та радіації). Екранування – шар реголіту. Навантаження від реголіту має бути збалансоване із внутрішнім тиском споруди;

- вакуум: жорсткий вакуум оточує Місяць. Цей вакуум виключає використання певних матеріалів, молекулярно-хімічна структура яких може бути нестабільною у місячних умовах;

- пил: поверхня Місяця має шар дрібних частинок, які порушуються та легко поміщається у підвіс. Ці частинки чіпляються за всі поверхні та створюють серйозні проблеми для роботи будівельної техніки та всіх відкритих поверхонь;

- простота конструкції: віддаленість від Місяця у поєднанні з високими витратами, пов'язаними із запусками із Землі, передбачає, що місячні структури мають бути прості у будівництві, оскільки діяльність загону космонавтів поза кораблем має бути зведена до мінімуму.

- конструкція та її елементи повинні бути практичними та модульними, щоб мінімізувати виготовлення елементів на Місяці на початковому етапі;

- використання місцевих матеріалів: надзвичайно важливе формування житла інопланетян на тривалу перспективу.

Враховуючи екстремальний характер навколишнього середовища, проєктовані конструктивні системи мають бути гнучкими щодо формоутворення, дизайну та будівництва.

Жорстка конструкція. На рис. 1.32 представлена концепція місячної бази (Boeing 1963) [17,18].

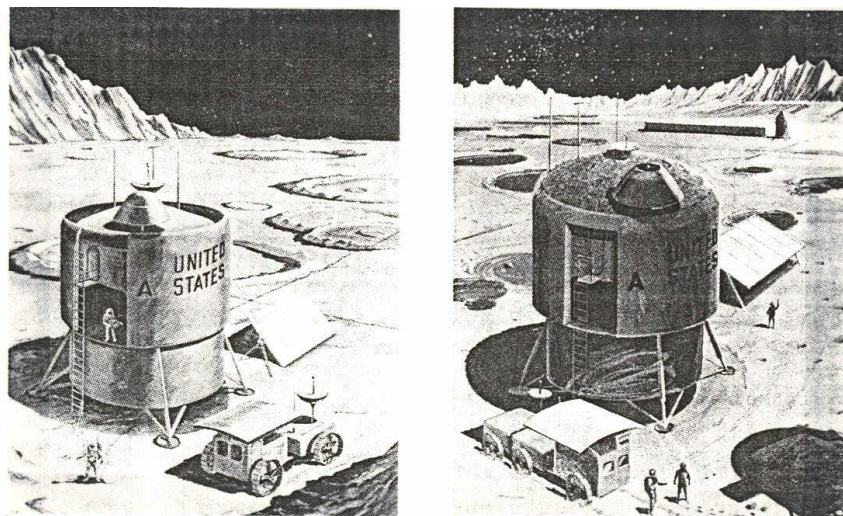


Рис. 1.32. Концепція місячної бази LESA, (Lunar Exploration System for Apollo)

Спочатку споруда LESA (Lunar Exploration System for Apollo) була розрахована на шість осіб, які подорожують протягом шести місяців. 46000 фунтів корисного навантаження, ядерний реактор потужністю 10 кВт, марсохід на 3765 фунтів та обладнання для переміщення реголіту, що використовується як захист. Творці відмічають, що не дивлячись простоту конструктивного вирішення споруди виникло багато проблем з його розміщенням на Місяці. Поверх циліндра поміщений екран із реголіту (у правій частині малюнка). У цій концепції реголіт також протікає вниз по внутрішній частині конструкції. Між внутрішньою та зовнішньою стінами передбачено забезпечення бічного екранування.

Ескізний проект Грандла місячної бази модульної конструкції [18]. Конструкція складається не менше ніж із шести циліндричних модулів (Рис. 1.33). Пропонується до запуску ракетою ARIANE із корисним навантаженням 12 тонн. Для посадки модулів на Місяць було запропоновано конструкцію телекерованого Ракетного крана, який буде зібрано на місячній орбіті. Модулі виготовлятимуться з алюмінієвих листів із використанням подвійної оболонки споруди для захисту екіпажу із восьми космонавтів від радіації, мікрометеоритів, високих та низьких температур протягом місячної ночі. Місячний реголіт буде використатися для захисту.

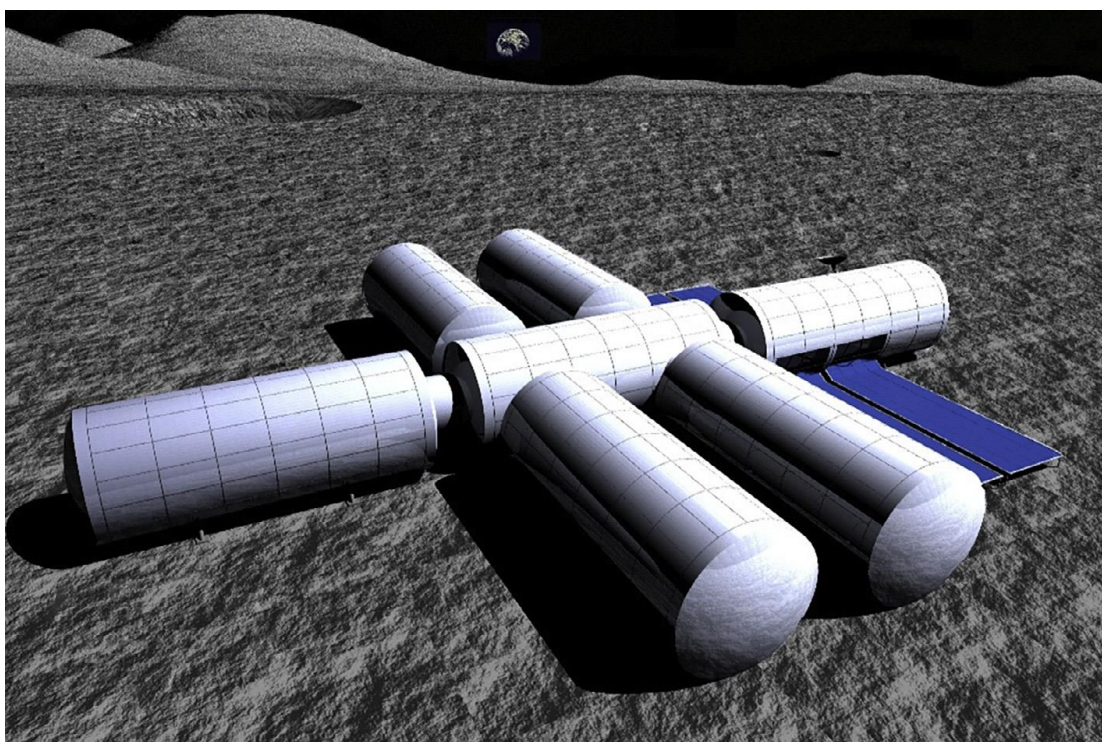


Рис. 1.33. Ескізний проект місячної бази модульної конструкції Грандла. Концепція подвійної оболонки.

Габарити циліндра: довжина -17 м, діаметр – 6 м, внутрішній діаметр – 4 м, див. (Рис. 34). Зовнішня стінка кожного циліндра є подвійною

оболонкою. Система посилена радіальними перебірками. У подвійній оболонці буде теплоізоляція з піноскла 0,25 м та захист з реголіту 0,65 м (Рис. 34). На думку авторів, на першій стадії освоєння місячного простору будуть використовуватися жорсткі конструкції для місячної бази. Також є очікування, що будуть використані на першій стадії жорсткі надувні конструкції та ISRU-похідні, шаруваті та промислові конструкції.

Надувна конструкція. У космосі виявлено такі переваги надувних конструкцій перед жорсткими конструкціями [18]:

- вони мають перевагу у вазі на 50 відсотків, тому що дуже тонкі матеріали використовуються (від 0,25 до 10 міл);
- вони мають 25-відсоткову перевагу в упаковці;
- надувна конструкція за своєю природою міцна та витримує великі навантаження;
- вони пропонують зниження витрат до десяти разів для таких конструкцій, як космічні антени;
- їх можна багаторазово надувати;
- вони можуть бути на 50 відсотків дешевшими, ніж інші пристрої, що розгортаються;
- їх можна надувати до різних форм;
- вони мають сприятливу динаміку щодо резонансів;
- вони мають сприятливі теплові характеристики.

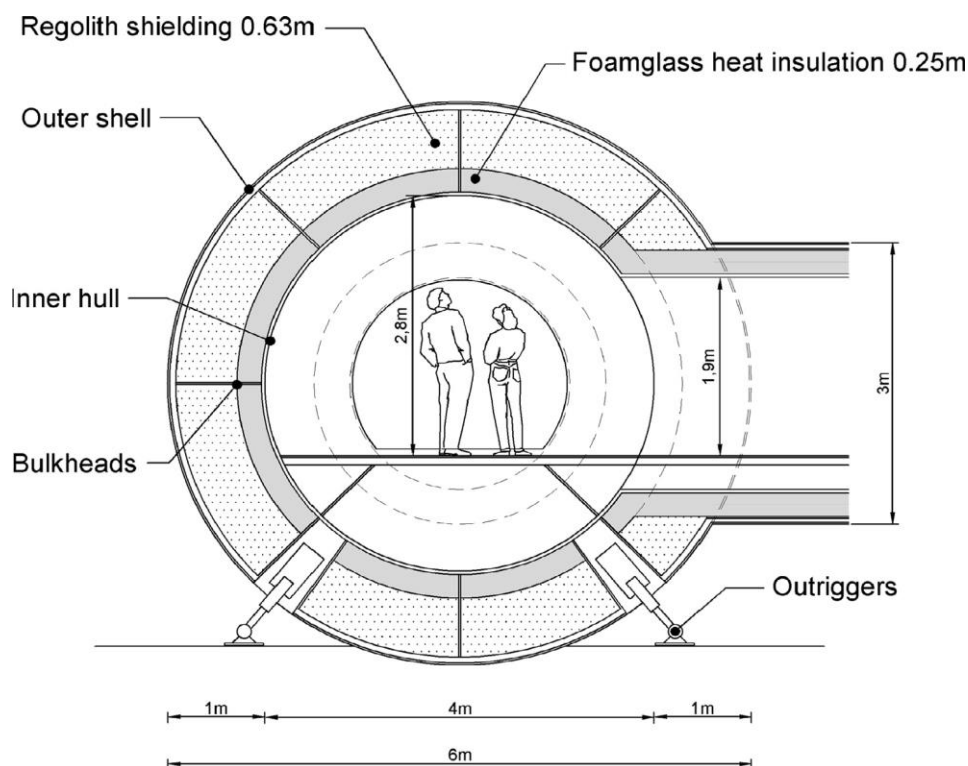


Рис. 1.34. Поперечний розріз модуля з подвійною оболонкою місячної бази модульної конструкції.

Vanderbilt та ін. (1988) запропонували концепцію подушкообразної структури як можливу систему постійної місячної бази [17]. Пропонована база складається із стьобаної надувної герметичної натяжної конструкції з використанням волокнистих композитів. Шар реголіту, що покриває споруду, забезпечує захист, з пристосуваннями для потрапляння сонячних променів.

Запропонована конструкція – альтернатива сфероїдальній надувній конструкції. Надувна конструкція може використовуватися як універсальний стенд, як конструкція різного функціонального використання.

У 1988-89 р. р. Чоу та Лін запропонували геометричну мембранну конструкцію для постійної місячної бази [17]. Виготовлена з двостінної мембрани та заповнена конструкційною піною. Під тиском тороподібний конструктивний елемент забезпечує оптимальні показники стійкості та довговічності конструкції. Екранування забезпечує покриваючий шар реголіту.

Технологія зведення конструкції: формування поверхні майданчика для будівництва відповідно до форми конструкції, укладання конструкції та під тиском тороїдальний конструктивний елемент набуває проектної форми. Структурна піна вводиться в надувний компонент, а внутрішній простір під тиском. Дно виїмки під конструкцію ущільнюється для забезпечення стійкості та рівної поверхні підлоги приміщення. Аналогічна технологія була використана у 2000 р. Ейхольдом для розробки концепції місячної бази у кратері.

Концепція довкілля та місячної надувної конструкції запропонована Робертсом, яка могла б задовольнити потреби дюжини астронавтів, що живуть і працюють на поверхні Місяця [18]. Космічний центр створений підрозділом Man Systems та інженерною компанією Johnson Engineering. S89-20084, липень 1989

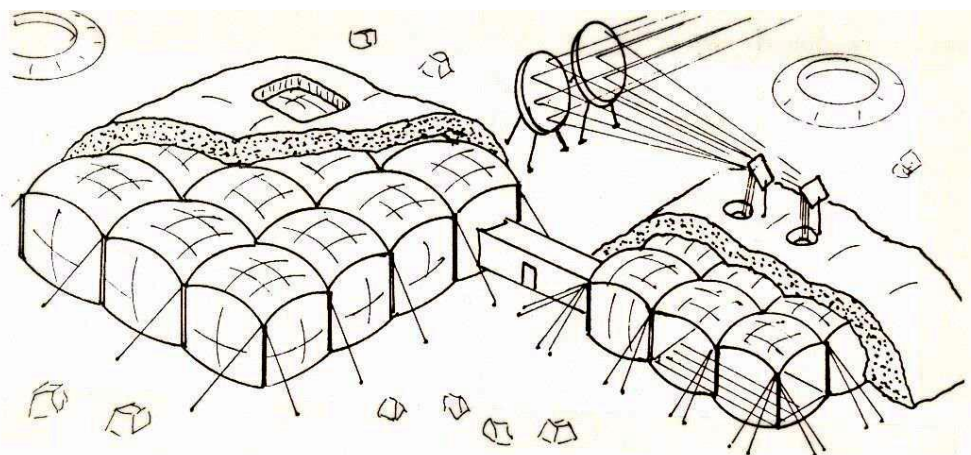


Рис. 1.35. Концепція надувної конструкції від Vanderbilt et al. Al, ASCE.

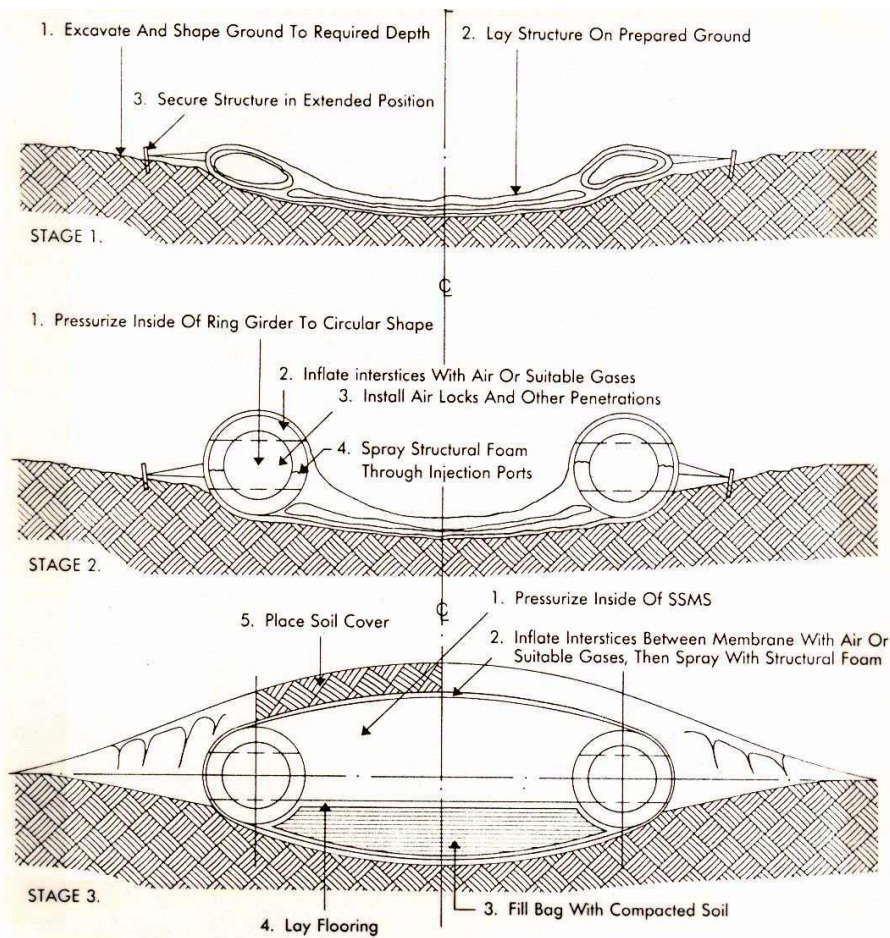


Рис. 1.36. Концепція надувної конструкції від Чоуїн Лин, ASCE

У запропонованій роботі вирішується комплекс питань структурно-функціональної та архітектурно-планувальної організації місячної бази надувної конструкції. Подано розріз місячної бази, що дозволяє познайомитися з внутрішнім пристроєм бази, а також організацією вхідного блок-шлюзу (Рис. 1.37).

Структурно-функціональна організація внутрішнього простору місячної бази: спортивна зона для космонавтів, оперативний центр бази, невелика чиста кімната, повністю обладнана лабораторія наук про життя, селенологічні роботи, гідропонні сади, кают-компанія, особисті приміщення для екіпажу. Повітряний шлюз. На верхньому рівні розташована зона дозвілля. Пилоуловлювачі для роботи на місячній поверхні, герметичний місяцехід, місячний посадковий модуль.

Графічне зображення концепції місячної бази відображає оцінку та дослідження в Johnson.

Дослідження показали, що особисті простори для роботи та відпочинку є важливими факторами психологічного благополуччя ізольованих груп. Надувна конструкція створює відчуття великого обсягу, передбачає диференціацію обсягів за величиною з урахуванням функціонального використання. Жорстка конструкція може збільшуватися

за рахунок однотипних за формою та величиною модулів. Розмір модуля продиктована габаритами вантажного відсіку ракети-носія. Надувні конструкції мають широкий діапазон формоутворення, але сферична форма найбільш об'ємна та ефективна.

Головні структуроутворюючі фактори: мембранні напруження, герметизація та опір проколу. Робертс запропонував троси та обручі, щоб зменшити мембранну напругу та зменшують локальний радіус кривизни. Надувна конструкція місячної бази має п'ять рівнів (рис. 1.38).

Сферична надувна конструкція має діаметр 16 м, об'єм – 2145 м³. Внутрішній тиск прийнято рівним 101,4 кПа. Надувний конверт виготовлений з високоміцного арамідного волокна Кевлар-29 з товщиною 0,114 мм і межею міцності на розрив 525 Н/см. Співвідношення обсягу споруди до обсягу упакованого матеріалу 10: 1. Місячна база покрита 3-метровим місячним реголітом.

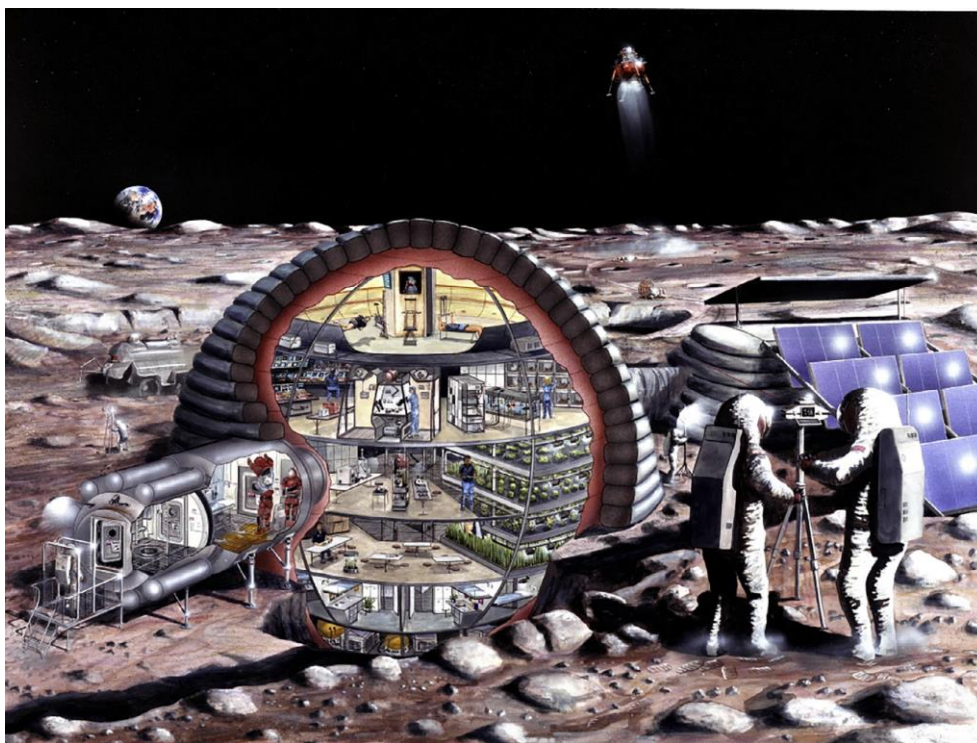


Рис. 1.37. Концепція середовища проживання в місячній споруді надувної конструкції. Пропозиція Робертса.

Надувне місце існування складається з сферичної пневматичної оболонки з внутрішньою структурною клітиною для підтримки підлог, стіни і обладнання, а також для забезпечення стійкості оболонки в разі втрати тиску. Проблеми, що викликають занепокоєння, включають:

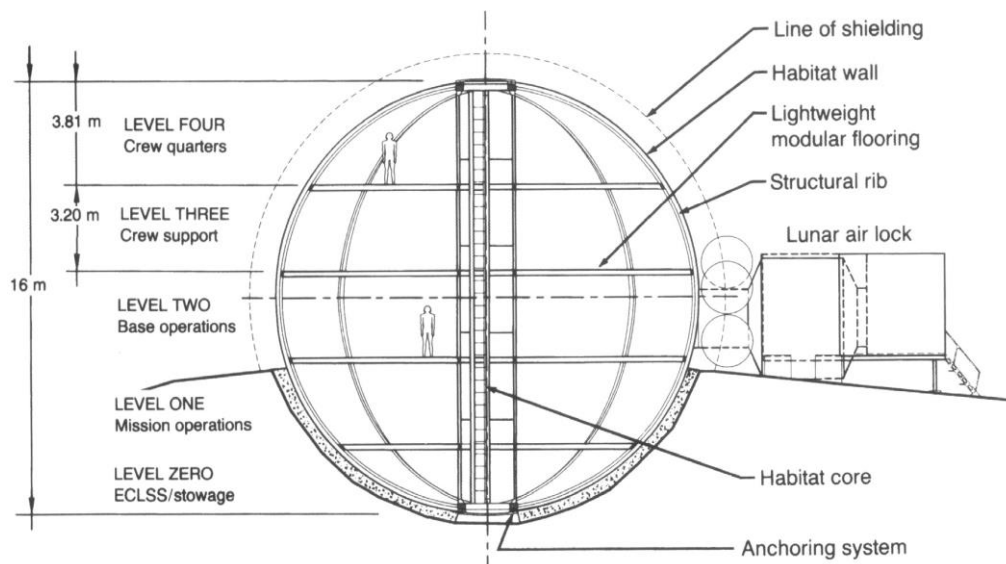


Рис. 1.38. Розріз місячної надувної конструкції. Пропозиція Робертса

- чутливість надувного матеріалу до радіаційного впливу;
- стирання між матеріалом доквілля та захисним реголітом, яке викликане відносним рухом між ними, через активність усередині структури та зовні;
- вплив на надувний матеріал екстремальних температур та вакууму при транспортуванні та монтажі конструкції.

У другому варіанті надувної конструкції місячної бази використаний високоміцний конструкційний алюміній 2219 для внутрішнього обрамлення та зовнішньої опорної конструкції [18]. Алюмінієва рама була розрахована та запроектована на основі правил проектування AISC. Фундаментний мат був розроблений з коефіцієнтом безпеки 4, що враховує межу плинності алюмінію та граничну несучу здатність місячного ґрунту. Каюти екіпажу розміщені нижче за рівень землі. Внутрішній алюмінієвий каркас містить: поперечні зв'язки між поверхами.

Досягнення технології матеріалів сприяли використанню композитних матеріалів в надувних конструкціях для космосу. Розробляються інші концепції надувних конструкцій місячних баз:

- концепція Лівермору - модуль доквілля;
- концепція НАСА - місячна складна надувна конструкція циліндричної форми з жорсткими торцевими заглушками;
- концепція NASA JSC TransHab - житловий модуль для космічної станції (втілена в життя компанією Bigelow Aerospace).

1.5. Загальні рекомендації щодо проектування, будівництва та функціонування місячної бази

Аналіз програм, концепцій та проектів створення поселення на місяці (місячної бази) дозволили систематизувати інформацію про проектування, будівництво та функціонування місячної бази (Таблиця 1.1 – Таблиця 1.3).

Таблиця 1.1 - Переваги та недоліки місць на поверхні Місяця для постійної місячної бази (за даними НАСА)

Параметри місячної орбіти		Особливі умови	Температурні показники	Переваги місцевості	Найцікавіші місця розташування бази
Полюси	Райони постійної темряви (вічної ночі)	Ось обертання Місяця перпендикулярна екліптиці	Місяць нагрівається вдень до 127°C, а вночі остигає до -173°C	Водяний лід на поверхні зручний для вилучення та використання в господарстві.	Кратер Шеклтон, що знаходиться у зоні вічної ночі. Південний полюс
	Райони постійного сонячного світла				
Зворотній бік Місяця		Немає радіоперешкод Землі			
Видимий бік Місяця		Постійна видимість землі та легкість зв'язку з нею			
Екватор		Видно всю небесну сферу, доступна з будь-якої орбіти		Астрономічні спостереження усієї небесної сфери	
Лімб		Поєднує переваги видимої та зворотної сторін			Кратер Шуберта у морі Сміта (східний лімб)
					Кратер Річчіолі (західний лімб)

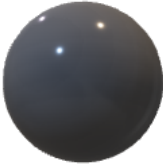
Таблиця 1.2 - Комплексний аналіз проектування, будівництва та функціонування місячної бази

Задачі будівництва місячної бази	1. Навчитися жити на іншому небесному тілі	
	2. Вивчення довкілля Місяця	
	3. Вивчення впливу небезпечних факторів життя на Місяці на людину та механізми	
	4. Вивчення способів використання ресурсів Місяця для будівництва місячної бази та створення системи життєзабезпечення. Місячний реголіт містить 42% кисню, 21% кремнію, 13% заліза, 7% алюмінію, ці матеріали дуже бажано навчитися видобувати та використовувати	
	5. Логістична (проміжна станція дозаправки паливом космічних апаратів)	
	6. Збір наукових даних (геологія та ін.)	
	7. Астрономічні спостереження	
Умови будівництва місячної бази	Небезпечні фактори життя на Місяці	Відсутність атмосфери (вакуум)
		Космічне випромінювання
		Метеорити
		Абразивний місячний пил
	Захист від небезпечних факторів	Людина
		Скафандр
		Укладання модулів у траншеї
		Розміщення модулів у тунелях у стіні кратера
Коло проблем, які вирішуються при створенні та експлуатації місячних споруд	Будівництво об'єктів на Місяці	Розміщення модулів у рукотворних печерах
		Підземні споруди
		Використання лавових труб
		Дах бази під реголітом
		Особливі конструктивних рішень модулів, що відкрито стоять на місячній поверхні
Коло проблем, які вирішуються при створенні та експлуатації місячних споруд	Конструкції та архітектура місячних споруд	Розробка системи життєзабезпечення, енергоживлення, зв'язку, збирання та зберігання інформації
		Проектування місячних машин та механізмів
		Дослідження питання про отримання кисню та води з місячних порід
		Створення програми досліджень, які мають проводитися персоналом місячного поселення

Структура місячного комплексу	Місячне поселення	Комплекс основної споруди (місячна база) – місце постійного перебування членів екіпажу ЛП. Тут забезпечуються повний захист людей від дії несприятливих факторів місячного середовища та найбільш комфортні та звичні умови життя
		Споруди науково-дослідного комплексу: обсерваторія, геофізична станція з установкою для надглибокого буріння
		Енергоцентр
		Транспортні засоби, які можуть об'єднуватися в автопоїзд
		Місячний космодром
		Установки для отримання кисню та води з місячного ґрунту
		Автоматичні стаціонарні наукові станції
		Штучні супутники Місяця наукового та прикладного призначення
		Автоматичні пересувні наукові станції типу «Місяцехід»
		Наземний командний комплекс
Структурно-функціональна організація місячної бази (основна споруда)	Мережа об'єктів, розміщених по всій поверхні Місяця	Транспортна космічна система «Земля - Місяць»
		Житлова зона: індивідуальні каюти, санітарний блок, блок життєзабезпечення
		Зона шлюзових камер та майстерень для ремонту техніки, наукових приладів та скафандрів.
		Побутова зона: кухня, їдальня (кают-компанія), блок зберігання запасів зневоднених та заморожених продуктів
		Оперативний центр бази
		Зона медичного обслуговування
		Зона наукових досліджень (лабораторій)
		Зона селенологічних лабораторій
		Спортивна зона
		Зона дозвілля
	Гідропонні сади	

Система життєзабезпечення місячної бази (основна споруда)	Підсистема регенерації атмосфери	
	Підсистема водозабезпечення, що здійснює регенерацію рідких відходів людини	
	Підсистема обробки та видалення твердих відходів	
	Підсистема санітарно-гігієнічного забезпечення	
	Підсистема зберігання та приготування їжі	
	Фітотрон (оранжерея), який одночасно є засобом психологічного розвантаження членів екіпажу	
Тип місячної бази	Стаціонарні	
	Мобильні	Місячна база-автопоїзд
		Місячна база-гусенична машина
Методи будівництва місячної бази	Комбіновані	
	(стаціонарна місячна база плюс всюдихід)	
	Будівництво бази за допомогою роботів, управління з Землі	
	Використання трансформованих модулів, які доставляються у складеному стані, надуваються і закриваються зовні реголітом	
Конструктивне рішення місячної бази	Використання 3D-друку при будівництві зовнішньої оболонки бази з реголіту, що розплавляється сонячними променями.	
	Будівельні матеріали	Бетонні конструкції
		Конструкції із металевого каркасу
		Конструкції із композитних матеріалів
		Гібридні конструкції
	Конструктивна система	Жерсткі
		Пневматичні
		Варіанти композицій із циліндричних модулів
		Сферична конструкція
		Циліндрична конструкція
		Тороїдальна конструкція
		Модульна конструкція

Таблиця 1.3 – Формоутворення місячних споруд

		Сфера
		Полусфера
		Циліндр горизонтальний
		Циліндр вертикальний
		Купол
		Капсула
		Тор

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 1

1. <https://reader.lecta.rosuchebnik.ru/demo/793462/data/chapters/chapter17/index.xhtml>; <http://gotourl.ru//1808>.
2. <https://ru.wikipedia.org/wiki>.
3. <https://bzh.life/plany/ukraintsy-sozdali-proekt-poseleniya-na-lune>.
4. https://www.bbc.com/russian/science/2015/08/150810_vert_fut_village_on_the_moon.
5. <http://information-technology.ru/17-science/6144-eka-pervye-poseleniya-na-lune-pri-pomoshchi-3d-pechati>.
6. <https://habr.com/ru/post/484052/>
7. <http://hightech.fm/2020/11/18esa-moon-habitat>
8. <https://kubnews.ru/obshchestvo/2019/09/09/open-lunar-sobiraetsya-osnovat-na-lune-nezavisimoe-poselenie/>.
9. <https://salik.biz/articles/47386-kolonija-na-lune-realnoe-budushee-ili-fantazii-milliarderov.html>.
10. <https://hi-news.ru/eto-interesno/kolonija-na-lune-realnoe-budushhee-ili-fantazii-milliarderov.html>.
11. <https://travelask.ru/blog/posts/13711-lunnyy-gorodok-turisty-i-dobycha-kisloroda-kakie-plany-u-yap>.
12. <https://korrespondent.net/tech/3777740-rossyiskaia-myssiya-na-lunu-prodlytsia-dve-nedely>.
13. https://epizodsspace.airbase.ru/bibl/tehnika_-_molodyoji/2003/6/30-35.html.
14. <https://www.mk.ru/science/2019/09/12/na-lune-mozhno-budet-zhit-dolgo-unikalnyy-proekt-rossiyskikh-razrabotchikov.html>.
15. <http://www.berlogos.ru/article/moontopia-konkurs-po-osvoeniyu-poverhnosti-luny/>.
16. Пыжов А.М., Синицын Д.А., Янов И.В., Лукашова Н.В., Багров А.В., Леонов В.А. Защитный купол обитаемой станции на поверхности Луны // Воздушно-космическая сфера. 2019. №3. С. 44-49. <https://www.vesvks.ru/vks/article/zaschitnyy-kupol-obitaemoy-stancii-na-poverhnosti--16452-2019> г.
17. Haym Benaroya Rutgers University. AN OVERVIEW of LUNAR BASE STRUCTURES: PAST and FUTURE* AIAA Space Architecture Symposium 10-11 October 2002, Houston, Texas. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2002-6113> - <http://spacearchitect.org/pubs/AIAA-2002-6113.pdf>
18. Haym Benaroya. Lunar habitats: A brief overview of issues and concepts. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Rutgers University, 98 Brett Road, Piscataway, NJ 08854, USA *REACH - Reviews in Human Space Exploration* 7–8 (2017) 14–33. - www.elsevier.com/locate/reach. <https://doi.org/10.1016/j.reach.2018.08.002>.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ УМОВ МІСЯЧНОГО СЕРЕДОВИЩА ТА ЇХ ВПЛИВУ НА ПРОЕКТУВАННЯ МІСЯЧНОГО МОДУЛЯ

2.1. Топологія поверхні

Місцева топологія поверхні місця розташування місячної бази матиме певний вплив на процес зведення конструкції і час, необхідний екіпажу для підготовки ділянки.

Членам екіпажу та роботам потрібно буде підготувати місце, де буде розташовуватися місячний модуль та база в цілому, видаляючи предмети (наприклад, виступаючі камені), які потенційно можуть заважати виконанню будівельних робіт, транспортуванню тощо.

Хоча все ще існує невизначеність щодо точної еволюції Місяця та його внутрішньої поверхні, місячна поверхня сьогодні вивчена набагато докладніше.

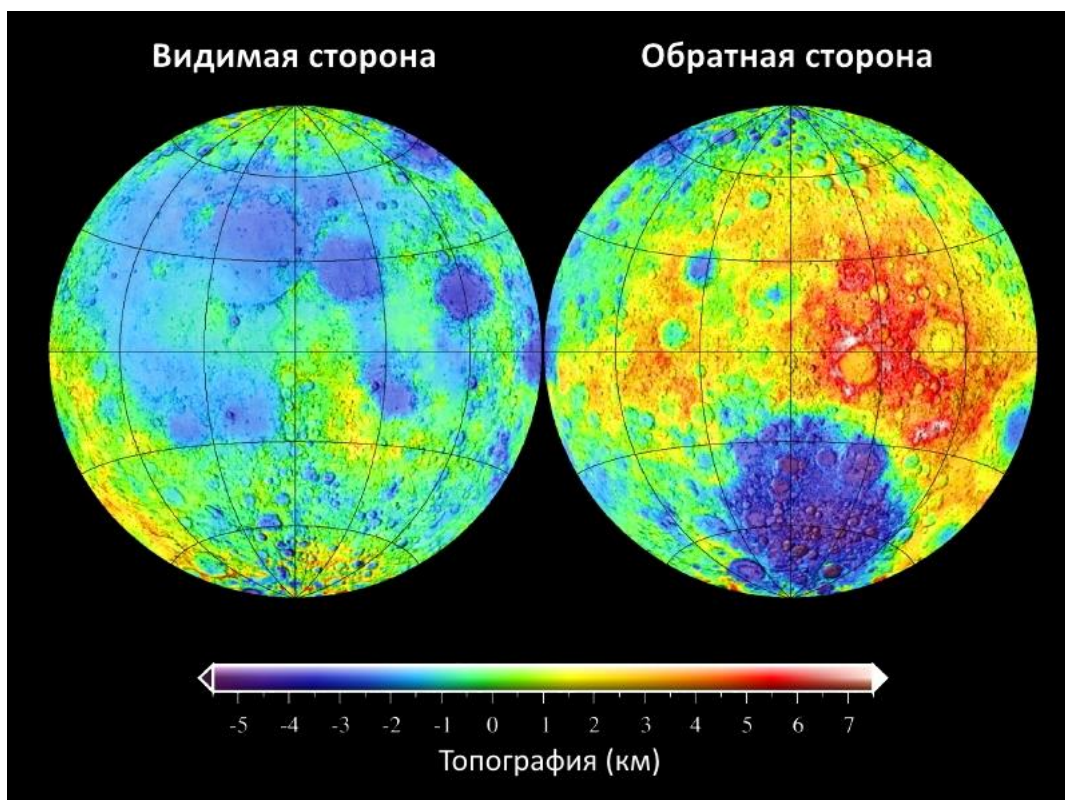


Рис. 2.1. Топографічна мапа Місяця [1]

Тоді як на топологія Землі утворена за рахунок тектоніки плит і ерозії вітром або рідкою водою, поверхня Місяця повністю утворена вулканізмом і космічним вивітрюванням.

На Землі під терміном «вивітрювання» розуміють сукупність процесів зовнішнього впливу на гірські породи, що призводять до їхнього руйнування. Це відбувається за рахунок коливань температури, впливу води у вигляді потоків річок та атмосферних опадів, діяльності вітрів та організмів. В результаті утворюються кори вивітрювання, іноді химерної форми, що становлять значні території.

Космічне вивітрювання – це комплекс процесів, які діють на космічний об'єкт, який знаходиться в агресивному середовищі відкритого космосу. Головними з цих процесів є: сонячний вітер, галактичний вітер, метеоритні бомбардування. Вперше космічне вивітрювання було зафіксовано на зразках місячних порід, доставлених Землю за програмою «Аполлон». На окремих зернах місячного ґрунту були виявлені мікроскопічні зони плавлення, що змінюють фарбування зерен та їх оптичні властивості. Космічне вивітрювання створює значний вплив на структуру, оптичні та мінералогічні властивості гірських порід та мінералів на об'єктах Сонячної системи, зокрема на Місяці.

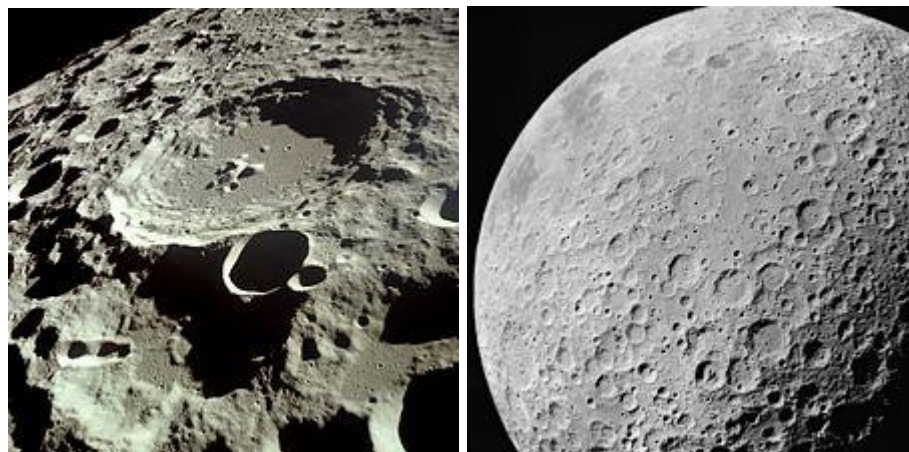


Рис. 2.2. Всіяний кратерами місячний ландшафт [2]

Удари метеоритів по місячній поверхні відповідають за макроскопічні особливості, такі як кратери (ударні і кільцеві басейни). У менших масштабах космічне вивітрювання впливає на властивості матеріалу на поверхні Місяця, змінюючи її спектральні властивості (наприклад, альбедо).

Особливості поверхні Місяця, викликані вулканізмом, включають моря, які, швидше за все, були басейнами викликаними ударами великих космічних тіл, які пізніше затопили лавою. Більш того, минулі потоки лави вважаються можливою причиною утворення хребтів і рифів навколо Місячних морів.

В даний час прийнята номенклатура деталей рельєфу місячної поверхні, перелік та визначення яких приведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Номенклатуру деталей рельєфу місячної поверхні

Тип деталі рельєфу	Визначення
Море	рівнина на Місяці, вкрита темною застиглою лавою
Озеро	темна область менших розмірів
Затока	частина моря, що входить в материк
Океан	обширна темна понижена область
Мис	частина материка, що виходить в море
Долина	лінійні пониження зі звивистими обрисами
Пряма стіна	уступо- або обривчастовидна форма рельєфу
Гори та гряди	крупні та лінійні височини неправильної форми
Борозда	довга, вузька западина на поверхні Місяця, що нагадує канал
Кратер	чашоподібне заглиблення в поверхні Місяця
Цепочка	ряд послідовно розташованих кратерів

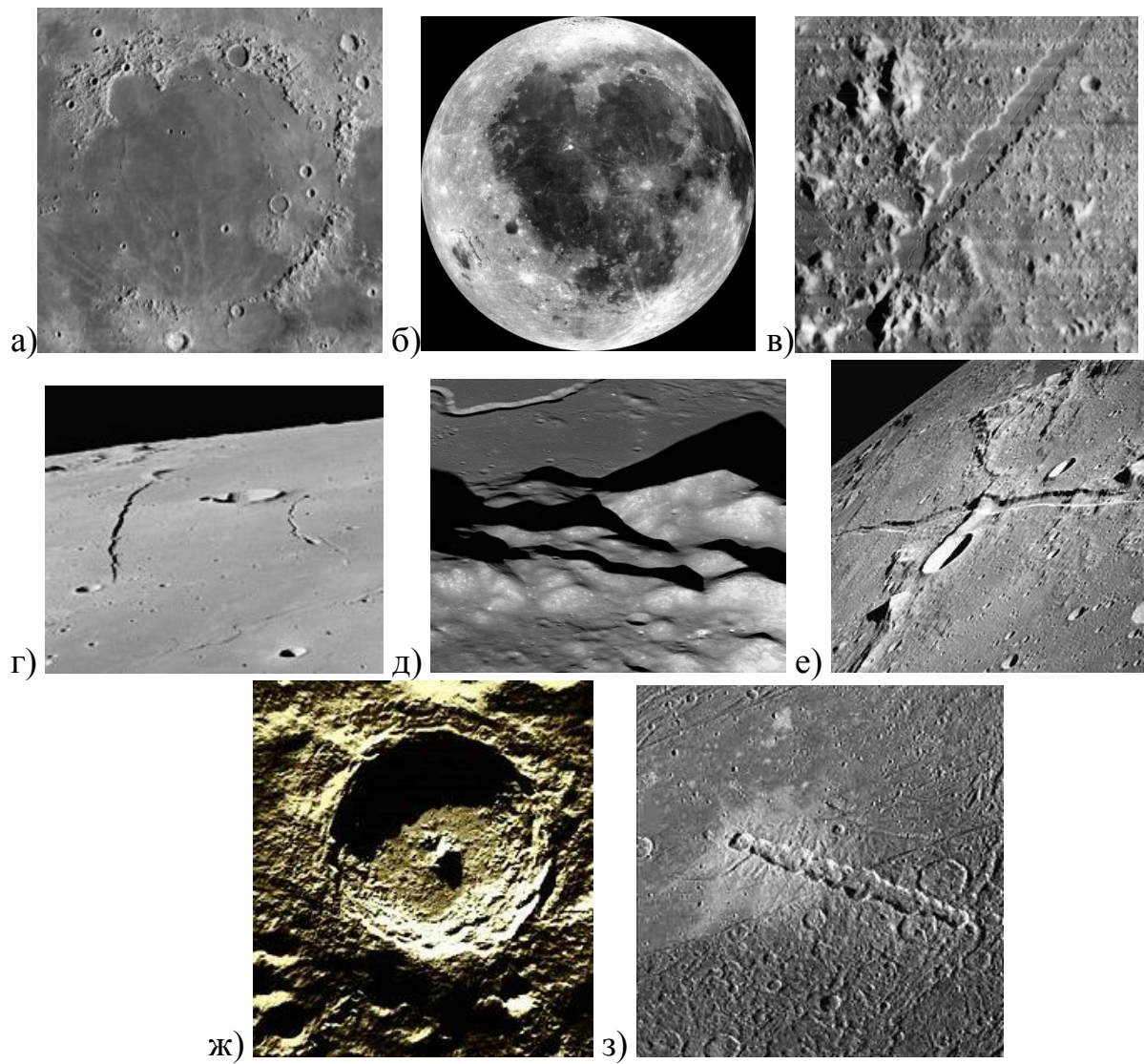
На відміну від експедицій, які теоретично можуть висаджуватися будь-куди, для постійного поселення дуже важливий вибір місця. Його переваги будуть використовуватись, а недоліки доведеться терпіти роками. І параметри місячної орбіти визначають кілька потенційно цікавіших місць для бази.

З точки зору вибору місця розташування, внутрішня структура кратерів може стати відмінним місцем для розгортання місячної бази.

Крім кратерів у числі елементів місячного рельєфу, що становлять інтерес при виборі місця розташування бази, слід зазначити природні порожнини як «лавових трубок», які здатні вмістити в собі підземне місто.

Ці труби виступають природними каналами, сформованими лавою, що протікала під поверхнею. Коли лава проходила, то зовнішні края застигали, формуючи міцну кору, яка залишилася навіть після зупинки потоку. Лавові трубки можуть мати практичне застосування для освоєння підповерхневого простору. За попередніми даними, вони достатньо міцні, щоб розмістити колоністів і захистити їх від радіаційного впливу, метеоритних ударів і різких температурних коливань.

Протяжність лавових трубок орієнтовно становить від десятків до навіть сотень метрів і товщиною зовнішнього шару (покриття), що перевищує 10 м. З огляду на це, лавові трубки вважаються потенційно місця для місячного середовища проживання. Товстий покриваючий шар таких печер забезпечить природний захист від радіації і метеоритів, а підземне розташування матиме додаткову перевагу більш стабільного теплового середовища.



*Рис. 2.3. Ілюстрації деталей місячної поверхні:
а) море; б) океан; в) долина; г) пряма стіна; д) гори; е) борозда;
ж) кратер; з) цепочка*

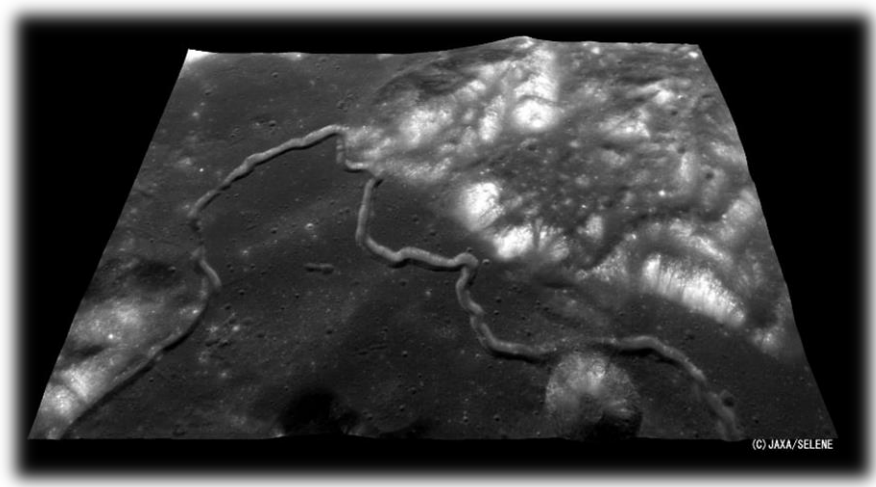


Рис. 2.4. Візуалізація лавових трубок під поверхнею Місяця

На жаль, встановлення наявності лавових трубок сьогодні можливе лише за допомогою ідентифікації непрямих ознак, наприклад, за обваленням верхнього покриття, і має високий ступінь невизначеності. До того ж, розміщення комплексів бази вимагає конкретного знання геометрії обсягів лавових трубок і стану міцності покриваючого шару, що можливе лише при обстеженні конкретної лавової трубки.

2.2. Властивості місячного ґрунту – реголіту

Реголіт – це поверхневий шар сипкого місячного ґрунту. Реголіт складається з уламків місячних порід та мінералів розміром від пиловидних частинок до декількох метрів у діаметрі і являє собою суміш фрагментів кристалічних порід, фрагментів мінералів, некристалічних твердих речовин (склянок), а також аглютинів і бреккію. Останні два складаються з менших зерен різних матеріалів, які були зварені разом в результаті удару метеорита на місячну поверхню. Товщина реголіту на поверхні Місяця може складати від 4 до 5 м в морях і від 10 до 15 м в гірських районах.

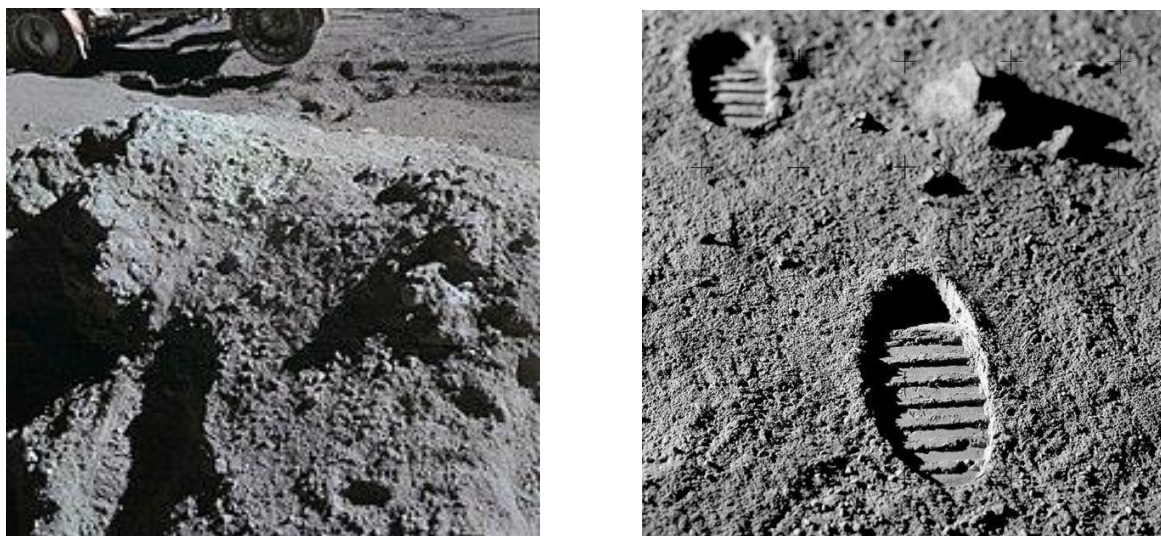


Рис. 2.5. Місячний ґрунт - реголіт

Фізико-механічні властивості місячного ґрунту активно вивчалися безпосередньо на поверхні Місяця в пілотованих та автоматичних експедиціях та в експериментальних лабораторних дослідженнях місячного ґрунту, доставленого на Землю. На сьогоднішній час склад і мінералогія реголіту вивчені досить детально із залученням останніх технічних досягнень. Основний масив даних було отримано завдяки місії «Аполлон», в ході якої вилучили з Місяця близько 382 кг гірських порід, гальки, піску та

пилу. Виділяється два типи місячного реголіта – материковий (світлий) і морський (темний).

Реголіт характеризується унікальним хімічним та мінералогічним складом, а також певними теплофізичними та електромагнітними властивостями. Низька теплопровідність, високі адгезійні та когезійні властивості, відсутність незв'язаної води та інших летючих, висока збагаченість розмірною фракцією частинок у десятки мікронів, поверхня яких активізована космічним опроміненням, збагаченість склом, а в ряді місць – важкими рудними мінералами (ільменітом), як найбільш доступний місцевий теплозахисний і будівельний матеріал.

Порівняльні дані про хімічному складі місячного ґрунту, а також деяких близьких за складом земних порід представлені в таблиці 2.2 [3]. Ця таблиця наочно демонструє, що земні та місячні породи, надзвичайно схожі, а значить, схожими є і технології обробки.

Хімічний склад визначається переважно складом корінних порід району. Геохімія процесу реголітоутворення визначається приносом речовини з інших районів, додаванням метеоритної речовини (до 1–2 мас. %) та збідненням летючими компонентами в результаті плавлення та селективного випаровування речовини. Постійна дія сонячного вітру та космічного випромінювання збагачує частинки реголіту воднем, рідкісними газами, широким спектром космогенних ізотопів та іншими компонентами, а також сприяє утворенню та відновленню до елементарного стану Fe, Si та ін елементів у поверхневих шарах частинок.

Таблиця 2.2 - Хімічний склад зразків місячного ґрунту, доставлених на Землю [6]

Оксиди	Місячні породи				Земні породи			
	«Морські» райони		«Материкові» райони		Базальт	Габбро- діабаз	Дуніт	Граніт
	Луна- 16	Apollo 15	Луна- 20	Apollo 17				
SiO ₂	42,95	45	44,2	48,5	47,0	45,0	40,49	72,2
TiO ₂	5,5	2,54	0,32	0,95	1,8	2,5	0,02	0,2
Al ₂ O ₃	13,88	8,9	19,1	17,2	14,5	11,8	0,86	13,4
FeO	20,17	22,21	6,91	14,4	7,35	1,8	5,54	0,64
MgO	6,05	9,08	13,37	8,94	7,67	0,2	0,16	0,6
CaO	10,8	10,27	13,3	11,6	10,0	4,5	0,7	2,24
Na ₂ O	0,23	0,28	0,48	0,4	1,58	2,0	0,1	3,0
K ₂ O	0,16	0,03	0,47	0,25	1,11	1,3	0,04	4,5

Розмір частинок місячного реголіту контролюється дробленням в результаті метеоритного та мікрометеоритного бомбардування, яке зменшує

розмір частинок, та аглютинацією (розбризуванням та налипанням скла при ударі), що збільшує розмір частинок.

За гранулометричними характеристиками типовий місячний реголіт є погано відсортованим піщано алевритовим ґрунтом з домішкою щебеню і брилом. Медіанний розмір частинок (середній розмір частинок, що розділяє зразки реголіту на дві рівні за вагою фракції) змінюється в межах від 40 до 130 мкм із середнім значенням 70 мкм. Таким чином, приблизно половина типового місячного реголіту за вагою складається з частинок, розмір яких менший за роздільну здатність людського ока.

Розмірний склад реголіту з глибиною змінюється від шару до шару, де кожен шар характеризується своєю власною текстурою та гранулометриєю. За даними буріння на глибину до 236 см у місці посадки експедиції Apollo-15 (Море Доців), у стратифікованій колонці реголіту було виділено 42 текстурних шари, в яких медіанний розмір часток змінювався від 44 до 89 мкм із середнім значенням близько 50 мкм. У цілому нині спостерігається деяке збільшення медіанного розміру частинок реголіту з глибиною, тобто. з глибиною реголіт стає більш грубозернистим.

Автори [4] відзначають, що єдиної закономірності зміни розмірного складу з глибиною немає і він визначається конкретною геологічною ситуацією та історією формування шару реголіту в конкретній локації.

Знання хіміко-мінералогічного та гранулометричного складу реголіту сьогодні дозволяє науковцям розробляти нові та адаптувати існуючі технології виробництва будівельних матеріалів з місцевої місячної сировини.

Досліди до певного часу велись на зразках, доставлених з Місяця. NASA веде архів цих місячних зразків, і вчені можуть запросити зразки для їх досліджень. Однак, через обмежену доступність і високу цінність цих місячних зразків, сьогодні в дослідженнях і розробках, пов'язаних з Місяцем, використовуються симулятори реголіту. Ці симулятори є матеріалами, виготовленими з природних або синтетичних наземних або метеоритних компонентів з метою моделювання одного або декількох фізичних або хімічних властивостей місячної породи або ґрунту.

Зведення окремих місячних модулів та й всієї місячної бази неминуче пов'язане з освоєнням нових територій. Для забезпечення надійності та безпеки споруд бази необхідно знати фізико-механічні властивості місячного ґрунту (реголіту), який по суті є природною основою для будівництва на Місяці.

Серед основних характеристик реголіту необхідних для створення інженерних моделей розглядаються такі як щільність і пористість, когезія та адгезія, кут внутрішнього тертя, міцність пухкого ґрунту на зсув, деформаційні характеристики (модуль деформації, коефіцієнт поперечної деформації), стисливість, несуча здатність.

Питома щільність (питома вага) місячного реголіту залежить від його хімічного та мінералогічного складу. Вона змінюється у досить широких межах від 2.3 до більш ніж 3.2 г/см³. Як рекомендоване середнє значення питомої щільності місячного реголіту зазвичай приймається 3.2 г/см³.

Пористість місячного реголіту визначається вільним простором між окремими частинками (міжзернова пористість) та відкритим вільним простором усередині частинок. Пористість прямо впливає на величину об'ємної ваги реголіту. Зв'язок пористості місячного реголіту (n) з його об'ємною та питомою вагою визначається наступним аналітичним виразом:

$$n = 1 - \frac{\rho}{G\rho_w} = 1 - \frac{\rho}{3.1}, \quad (2.1)$$

де ρ – об'ємна вага реголіту,
 ρ_w – густина води (1 г/см³),
 G – питома густина реголіту.

В табл. 2.3 приведені дані щодо величини пористості реголіту в залежності від глибини. У верхньому шарі реголіту товщиною близько 15 см середня пористість перевищує 50%, а на глибини від 30 до 60 см пористість знижується до 44%.

Таблиця 2.3 - Зміна пористості місячного реголіту по глибині [6]

Глибина, см	Середня пористість, %
0..15	52±2
0..30	49±2
30..60	44±2
0..60	46±2

Об'ємна вага (щільність) є однією з найважливіших та визначальних фізико-механічних характеристик місячного реголіту. Від об'ємної ваги залежать фізико-механічні, теплофізичні, електромагнітні та інші властивості. Об'ємна вага (ρ) визначається, насамперед, хімічним та мінералогічним складом частинок реголіту, і може бути визначена в залежності від питомою ваги і пористості:

$$\rho = G\rho_w(1 - n), \quad (2.2)$$

де G – густина реголіту,
 ρ_w – густина води,
 n – пористість.

За даними місій Apollo середня щільність реголіту в шарі товщиною 30 см склала 1.58 г/см³, а на глибинах від 30 до 60 см – 1.74 г/см³. Середнє значення об'ємної ваги реголіту на глибині до 15 см становить 1.50 г/см³, а на глибині 60 см – 1.66 г/см³.

Таблиця 2.4 - Зміна об'ємної ваги місячного ґрунту за глибиною [6]

Глибина, см	Середня об'ємна вага, г/см ³
0..15	1,5±0,005
0..30	1,58±0,005
30..60	1,74±0,005
0..60	1,66±0,005

Середнє значення об'ємної ваги реголіту на поверхні може бути прийняте 1.3 г/см³.

Для ідеалізованих розрахунків розподілу об'ємної ваги місячного ґрунту по глибині також рекомендується застосовувати наступну залежність:

$$\rho = 1.39z^{0.056}, \quad (2.3)$$

де z – глибина.

Кут внутрішнього тертя. Когезійні сили зчеплення між частинками пухкого реголіту виявляються в здатності реголіту до злипання, в результаті чого ґрунт може тримати вертикальні стінки невеликої висоти.

Місячний ґрунт у пухкому стані має не значне зчеплення та малий кут внутрішнього тертя. У міру ущільнення ґрунту до об'ємної ваги 1.5 г см-3 опір зсуву зростає за рахунок збільшення сил зчеплення, так і за рахунок збільшення кута внутрішнього тертя. При подальшому ущільненні реголіту вище 1.5 г см-3 кут внутрішнього тертя наближається до 25°.

У міру зменшення ступеня ущільнення ґрунту його опір зсуву знижується. При об'ємній вазі 1.29 г/см³ кут внутрішнього тертя складає всього 10-12°. Для ґрунту щільністю 1.61 г/см³ кут внутрішнього тертя дорівнює 46°.

Міцність на зсув місячного ґрунту суттєво залежить від ступеня ущільнення. В свою чергу, від величини міцності на зсув залежать такі важливі властивості ґрунту, як несуча здатність та величина кута природного укосу пухкого ґрунту, а також важкість його розробки землерийними машинами та механізмами.

Таблиця 2.5 - Значення когезії та кута внутрішнього тертя місячного ґрунту [6]

Глибина, см	Когезія, кПа		Кут внутрішнього тертя, град.	
	середнє	інтервал	середнє	інтервал
0..15	0,52	0,44..0,62	42	41..43
0..30	0,9	0,74..1,1	46	44..47
30..60	3,0	2,4..3,8	54	52..55
0..60	1,6	1,3..1,9	49	48..51

В табл. 2.6 та 2.7 приведені дані щодо межа міцності на зсув місячного ґрунту в залежності від щільності та її зміни за глибиною [6].

Таблиця 2.6 - Межа міцності на зсув місячного ґрунту в залежності від щільності за експериментальними даним [6]

Щільність, г/см ³	Міцність на зсув, кПа
0,99	0,021
1,43	0,062
1,6	0,07
1,7	0,31
1,87	0,28

Таблиця 2.7 - Зміна межі міцності на зсув місячного ґрунту по глибині [6]

Глибина, см	Межа міцності на зсув, кПа
5	0,1..2,5
50	1..3,5
100	2..4
200	4..8
0..200	0,1..8

Для оцінки механічних параметрів місячного ґрунту рекомендованим є наступне рівняння:

$$\tau = a\sigma^b, \quad (2.4)$$

де σ - нормальне напруження (кПа);

a, b – константи ($a = 1.83, b = 0.73$).

Кут внутрішнього тертя місячного ґрунту може бути визначений за формулою:

$$\varphi = \frac{1}{\operatorname{tg}(ab\sigma^{-b})}, \quad (2.5)$$

Своєю чергою когезія місячного ґрунту з використанням залежностію:

$$c = a(1 - b)\sigma^b. \quad (2.6)$$

Модуль деформації відповідно до розподілу об'ємної ваги реголіту по глибині в поверхневому шарі оцінюється в межах 15-29 кПа, а в інтервалі глибин 30-60 см та глибше приблизно 240 кПа.

Таблиця 2.8 - Модуль деформації місячного ґрунту в залежності від його об'ємної ваги

Об'ємна вага реголіту, г/см ³	Модуль деформації, кПа
1,12	15,3
1,29	28,4
1,45	83,4
1,62	235,4

Коефіцієнт Пуассона (μ) (або коефіцієнт поперечної деформації), є показником здатності породи до зміни обсягу в процесі деформації під дією напружень.

Середнє значення коефіцієнта Пуассона для місячного ґрунту приймається $\mu = 0.2$.

В залежності від коефіцієнта Пуассона може бути визначений коефіцієнт бічного розширення місячного ґрунту (ξ):

$$\xi = \frac{\mu}{1 - \mu}, \quad (2.7)$$

$$\mu = \frac{\xi}{1 + \xi}. \quad (2.8)$$

Несуча здатність місячного ґрунту це максимальне допустиме навантаження, при якому не відбувається перекидання об'єкта на місячній

поверхні. Гранична несуча здатність залежить від щільності ґрунту, міцності ґрунту на зсув та від розмірів та форми опори. Для опори шириною 1 м гранична несуча здатність місячного реголіту оцінюється 6 МПа.

Несуча здатність місячного ґрунту на валу деяких кратерів приблизно вп'ятеро нижче, ніж на горизонтальних ділянках та схилах кратера.

Експериментальна залежність несучої здатності (q) місячного ґрунту від об'ємної ваги (ρ) приведена на рис. 2.6.

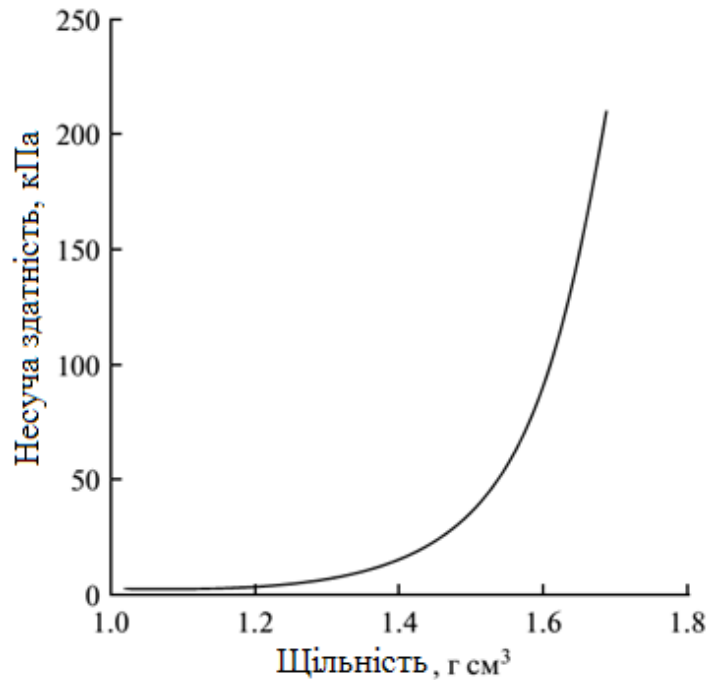


Рис. 2.6. Несуча здатність місячного реголіту в залежності від його об'ємної ваги

Для аналітичного опису цієї залежності використовується апроксимуюче рівняння:

$$q = 0.00057 e^{7.44\rho}. \quad (2.9)$$

Таким чином, на сьогоднішній день найбільше даних існує про фізико-механічні властивості для найбільш пухкого поверхневого шару. Є певні дані щодо зміни властивостей реголіту на глибину до 60 см та обмежені характеристики на глибину до 2 м. Проте фактично відсутні дані про ґрунт на глибинах більше 2 м, що потребує розробки опор місячних модулів з урахуванням відомих даних.

2.3. Сейсмічна активність

Сейсмічні коливання поверхні Місяця називаються *місяцетрусами*.

Геофізичні дослідження Місяця почалися з пілотованих місячних місій Apollo, в ході яких було встановлено безліч інструментів для дослідження, включаючи сейсмометри, поверхневі магнітометри, датчики теплового потоку, ретрорефлектори та гравіметри на її поверхні. Багато що з того, що сьогодні відомо про Місяць, отримано в результаті аналізу цих наборів даних, які з часів Apollo постійно доповнюються новими місіями.

З усіх геофізичних методів сейсмологія дає найбільш докладну інформацію через свою більш високу роздільну здатність. Сейсмометри були розміщені на поверхні Місяця під час кожної з місій Аполлона. Чотири із сейсмічних станцій (12, 14, 15 та 16), які були розміщені приблизно в рівносторонньому трикутнику (з відстанями між кутами приблизно 1100 км), працювали одночасно з грудня 1972 року до вересня 1977 року. За цей період понад дванадцять тисяч подій були зареєстровані та каталогізовані за допомогою довгоперіодичних датчиків, включаючи дрібні та глибокі місяцетруси, а також удари метеороїдів та удар, спровоковані людською діяльністю на Місяці.

Пасивні сейсмічні експерименти (PSE) проводилися на станціях Apollo 11, 12, 14, 15 та 16 (станція 11 працювала лише протягом одного місячного місяця). Активні сейсмічні експерименти (ASE) проводилися на станціях 14 і 16. Другий активний експеримент, відомий як експеримент з місячного сейсмічного профілювання (LSPE), проводився на станції 17. Станція 17 також включала місячний поверхневий гравіметр (LSG), який є джерелом додаткової сейсмічної інформації

Крім того, за допомогою короткоперіодичних датчиків було зареєстровано ще багато теплових землетрусів. Те, що Місяць виявився таким «активним», стало своєрідним сюрпризом. До висадки на Місяць була поширена думка, що Місяць був геологічно мертвим тілом. На той час очікувалося, що при висадці буде зареєстровано лише удари метеороїдів, з яких буде виведено внутрішню структуру Місяця.

Встановлення існування глибоких і неглибоких місяцетрусів було щасливим відкриттям, а не випадковим, і зробило багато для покращення моделей внутрішньої будови Місяця.

Сейсмічні струси відбуваються на Місяці регулярно, проте вони дуже відрізняються від землетрусів на планеті Земля. Багаторічні спостереження за сейсмічною активністю Місяця дозволили зареєструвати тисячі місяцетрусів, більшість з яких багаторазово повторювалися в одних і тих же осередках.

За рік на Місяці відбувається від 600 до 3 000 сейсмічних подій. Загалом виявлено чотири види сейсмічних подій :

- приливні струси (інша назва – глибокі)
- метеоритні струси
- термальні струси
- тектонічні струси (інша назва – неглибокі)
- штучний вплив.

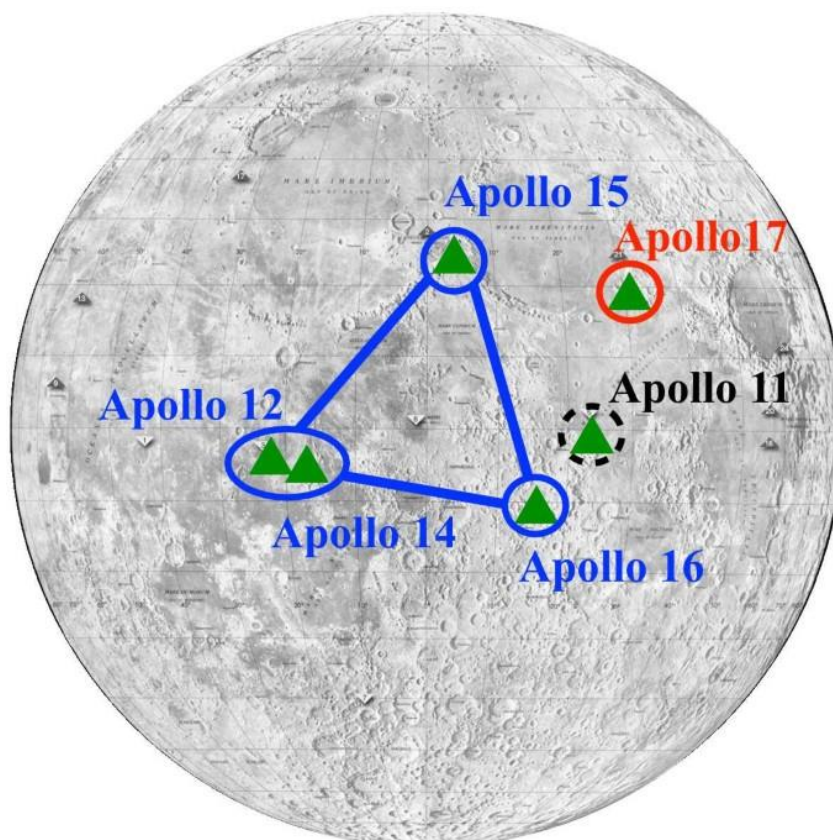


Рис. 2.7. Розташування станцій Apollo на Місяці

На рис. 2.8 приведена схематична мапа видимої сторони Місяця із позначенням розташування станцій Apollo 12, 14, 15 та 16 та епіцентрів зафіксованих сейсмічних подій.

На рис. 2.8 приведено приклади сейсмограм для глибокого місячного струсу, удару метеорита, неглибокого місячного струсу та події штучного впливу. Події були зафіксовані на сеймостанції Apollo 12. Час на графіках відраховується від моменту першого прибуття, яке вказується на кожній із подій. Масштаб по осі Y представлений у цифрових одиницях і відрізняється для кожної з подій. Графік з найвищою амплітудою (штучний вплив) обрізано.

Приливні струси Місяця трапляються двічі на місяць, кожні два тижні, коли Місяць опиняється на одній прямій із Землею та Сонцем, тобто під час повного місяця та нового місяця. У ці періоди посилюється вплив на Місяць приливних сил Землі та Сонця. При розташуванні цих трьох небесних тіл на одній лінії сили їх взаємний вплив один на одного підсумовується, що призводить до виникнення на Місяці струсів на глибині 800-1000 км.

Вони мають дуже повторювані форми хвиль, що свідчить про те, що вони походять із джерел, які щільно згруповані. Кількість таких груп має щонайменше 165 різних регіонів джерела, в основному на видимій стороні Місяця.

Метеоритні струси – це наслідки вибухів, що виникають під час падінь на поверхню Місяця метеоритів. Більшість струсів цього типу відбувається, коли орбіту Місяця перетинає якийсь із метеорних потоків. Також може бути і падіння одиночних метеоритів.

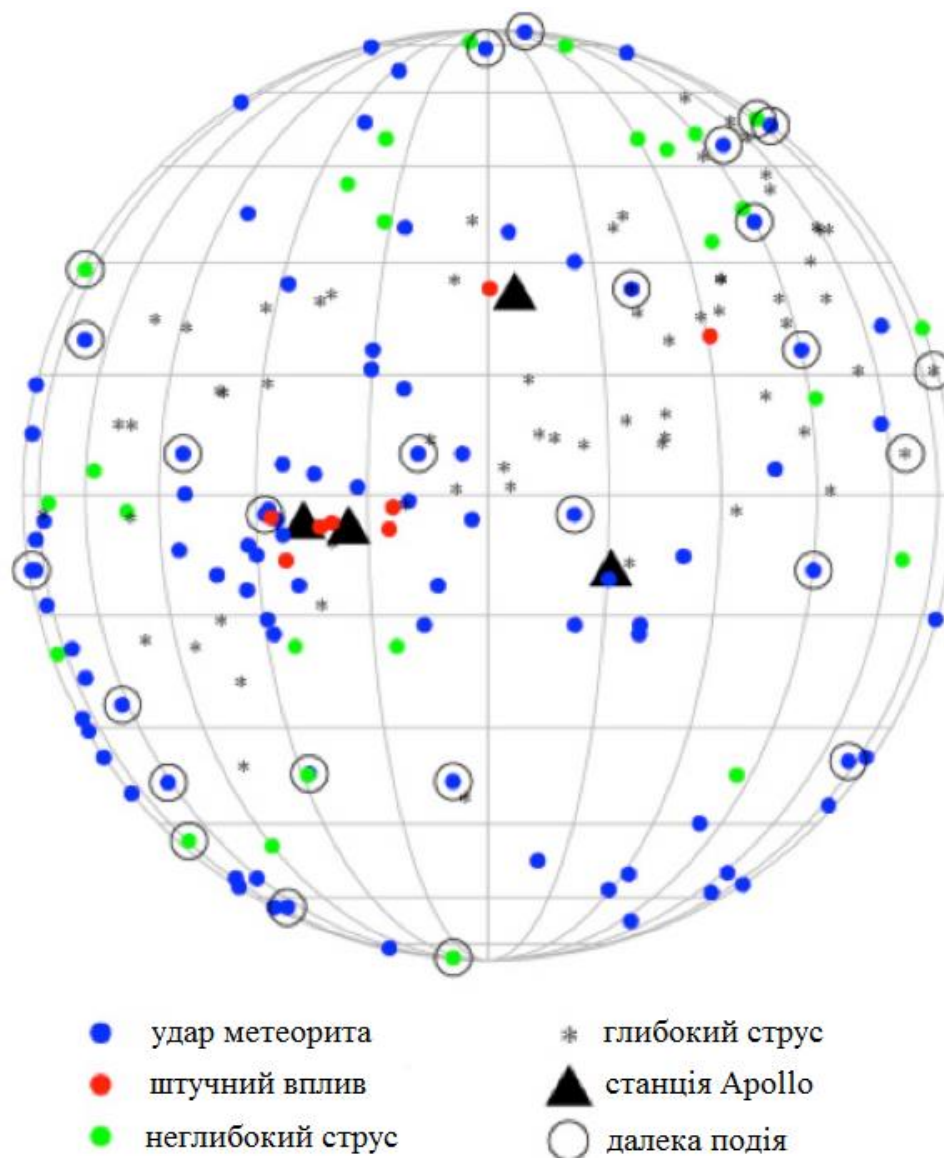


Рис. 2.8. Мапа видимої сторони Місяця із позначенням зафіксованих сейсмічних подій

Понад 1700 подій, зареєстрованих під час роботи станцій Apollo, стосуються ударів метеороїдів. Виявлено два різні класи метеороїдів, що падають на Місяць, що походять від комет, або від астероїдів, і оцінили масу метеороїдів в діапазоні від 100 г до 100 кг.

Оскільки Місяць практично не має атмосфери, удари метеоритів мають високу швидкість, а ударне тіло має тенденцію фрагментуватися і випаровуватися. Вочевидь, зіткнення метеороїдів з Місячною поверхнею мають екзогенне походження. Сейсмічні хвилі поширюються через шар реголіту та мегареголіту двічі, один раз у джерелі удару, а другий нижче за

сейсмічну станцію. Це призводить до різних характеристик розсіювання і генерує поступовий початок сигналу і більш довгий хвіст запису порівняно з неглибокими і глибокими місячними струсами.

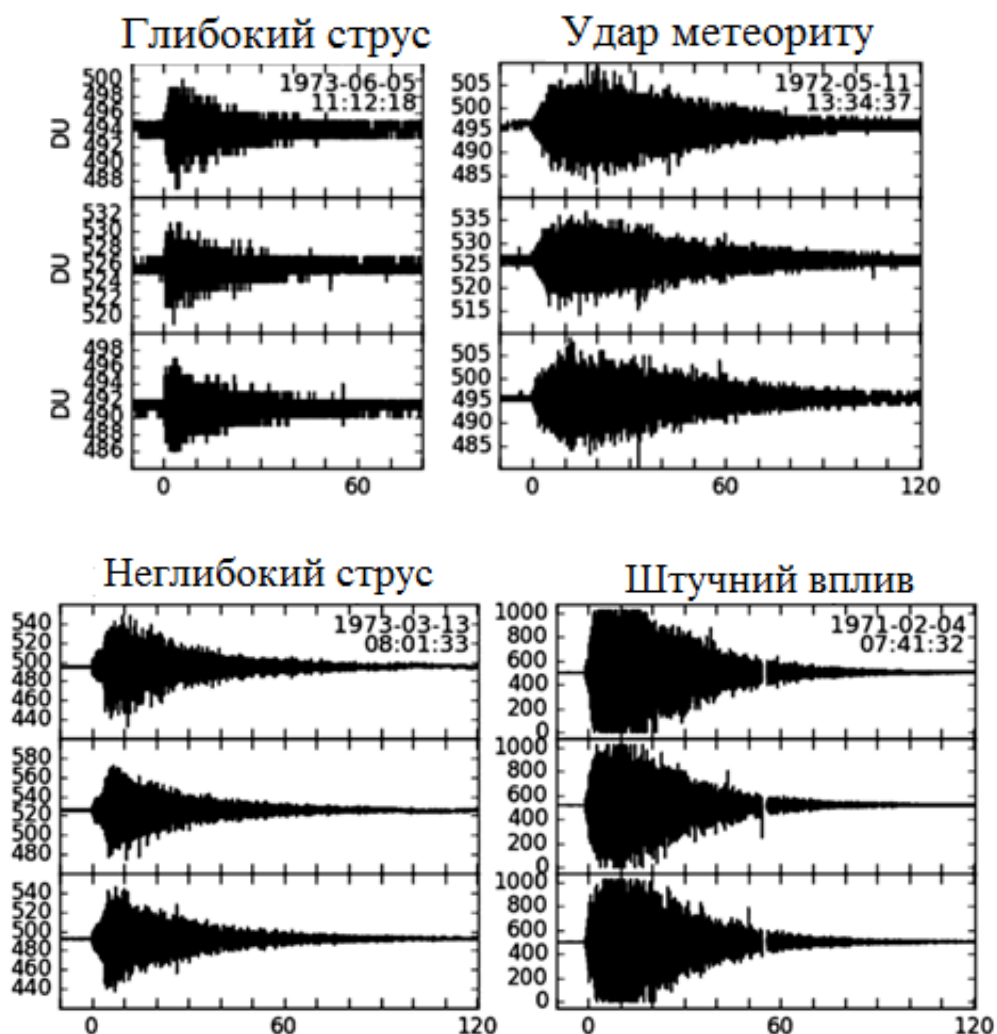


Рис. 2.9. Приклади сейсмограм для глибокого місячного струсу, удару метеорита, неглибокого місячного струсу та події штучного впливу

Термальні струси, найслабші з усіх, починаються зі сходом Сонця, коли після тривалої ночі, що триває на Місяці близько 14 земних діб, холодна поверхня починає різко нагріватися. При цьому відбуваються зсуви ґрунту на крутих схилах, зсуви, осипи та інші зсуви верхнього шару, що призводять до невеликих здригання поверхні Місяця.

Тектонічні (неглибокі) струси відбуваються при рухах у неглибоких шарах Місяця (10-30 км). Спектри неглибоких місяцетрусів мають високі частоти, що добре видно на короткоперіодичних сейсмографах. У той час як

глибокі місячні струси мають сейсмічну енергію вище 1 Гц, енергія неглибоких місячних струсів становить приблизно до 8 Гц, а потім спадає.

Окремий тип струсів відноситься до подій *штучного впливу*, а саме приземлення та робота місячних апаратів тощо.

Перші три типи місячних струсів, як правило, є легкими і нешкідливими. Найбільшу небезпеку для можливих місячних баз становлять тектонічні місяцетруси.

Між 1972 та 1977 роками мережа сейсмографів зареєструвала 28 подібних місяцевих трясінь. Місяцїтрясіння зазвичай мають дуже невелику магнітуду. Найбільший дрібний місячний землетрус має за шкалою Ріхтера магнітуду 5 – 6 балів, тоді як глибокі місяцетруси мають магнітуду менше 3.

Згідно шкали MSK-64 (у балах) сейсмічні події в залежності від магнітуди характеризуються наступним чином:

- 1 бал (непомітне) - відзначається лише спеціальними приладами;
- 2 бали (дуже слабке) - відчувається тільки деякими людьми у верхніх поверхах будівель, також на них реагують домашні тварини;
- 3 бали (слабке) - відчувається лише всередині деяких будівель, як струс від вантажівки;
- 4 бали (помірне) - землетрус відзначається багатьма людьми; можливе коливання вікон та дверей;
- 5 балів (досить сильне) - хитання висячих предметів, скрип підлог, деренчання скла, обсипання побілки;
- 6 балів (сильне) - легке пошкодження будівель: тонкі тріщини в штукатурці, тріщини у вентканалах тощо.

З вищенаведеної інформації цілком очевидним є висновок, що при Місячна сейсмічна активність істотно впливатиме на конструкції місячних модулів і її обов'язково необхідно враховувати при проектуванні.

Місячні сейсмічні сигнали мають велику тривалість і високу частоту. Ці характеристики місячних сейсмограм пов'язані з інтенсивним розсіюванням у сильно неоднорідному, сухому і пористому місячному ґрунті (реголіті) і з низьким внутрішнім загасанням місячних надр.

Місяцетруси тривають помітно довше, ніж земні – понад 10 хвилин. Для порівняння, на Землі коливання кори загасають вже через півхвилини, і навіть найсильніші землетруси не тривають понад 2. хвилини. Це пояснюється тим, що на відміну від Земних, породи Місяця є сухими та твердими. Тому місяцетруси призводять до того, що планета вібрує подібно до камертону. Для майбутніх місячних поселенців такі тривалі поштовхи можуть завдати більше шкоди, ніж Землі.

Місячний модуль має проектуватися із застосуванням пасивних та активних заходів сейсмозахисту. При цьому пасивний спосіб передбачає підвищення несучої здатності основних конструктивних елементів за рахунок збільшення розмірів їх поперечного перерізу та міцності. Активні заходи або сейсмоізоляція можуть виконуватися різним шляхом: адаптація до зовнішнього впливу, штучне підвищення демпфування, антирезонансне

гасіння коливань, створення умов ізоляції модуля від сейсмічних коливань ґрунту [11].

При розробці заходів із сейсмоізоляції можливо застосування наступних рішень:

- сейсмічне екранування ґрунтової основи,
- ковзні фундаментні сеймопояси;
- гнучкий нижній поверх;
- гнучкостержневі опори або пояси;
- підвісні опори;
- гумометалеві або інші віброізолюючі опори;
- гідрофрикційні опори;
- кінематичні опори.

Сейсмоізоляція також може додатково включати засоби підвищеного демпфування коливань. При сейсмоізоляції опорні частини місячного модуля можуть рухатися, коливаючись щодо ґрунту зі своєю зниженою амплітудою, а спектр власних коливань при цьому може бути виведений за межі спектрів місяцетрусів.

За рахунок системи сейсмоізоляції можливо ізолювати місячний модуль від коливань ґрунту за рахунок використання інерції спокою. При цьому ґрунт основи під модулем коливається з найменшою залежністю від маси будівлі за рахунок усунення жорсткого зв'язку модуля з основою шляхом заміни її на податливий зв'язок, що передає будівлі тим меншу силу від руху ґрунту, чим більш податливий зв'язок ґрунту з будинком.

Деякі схеми активного сейсмосахисту, що застосовуються у «земних» будівлях і спорудах та є перспективними для місячних модулів приведені на рис. 2.10.

2.4. Гравітація

На сьогоднішній день Місяць, серед інших космічних тіл, має найкраще вивчене гравітаційне поле завдяки місії Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL), першої спеціалізованої місії з вивчення гравітаційного поля і внутрішньої будови Місяця космічними апаратами, які були запуснені 2011 року та виконували свою роботу в 2012 р.

Метою місії GRAIL було отримати карту місячного гравітаційного поля з роздільною здатністю 30 кілометрів, еквівалентним градусу та порядку 180 сферичних гармонік (типові базисні функції, що використовуються для гравітаційних досліджень).

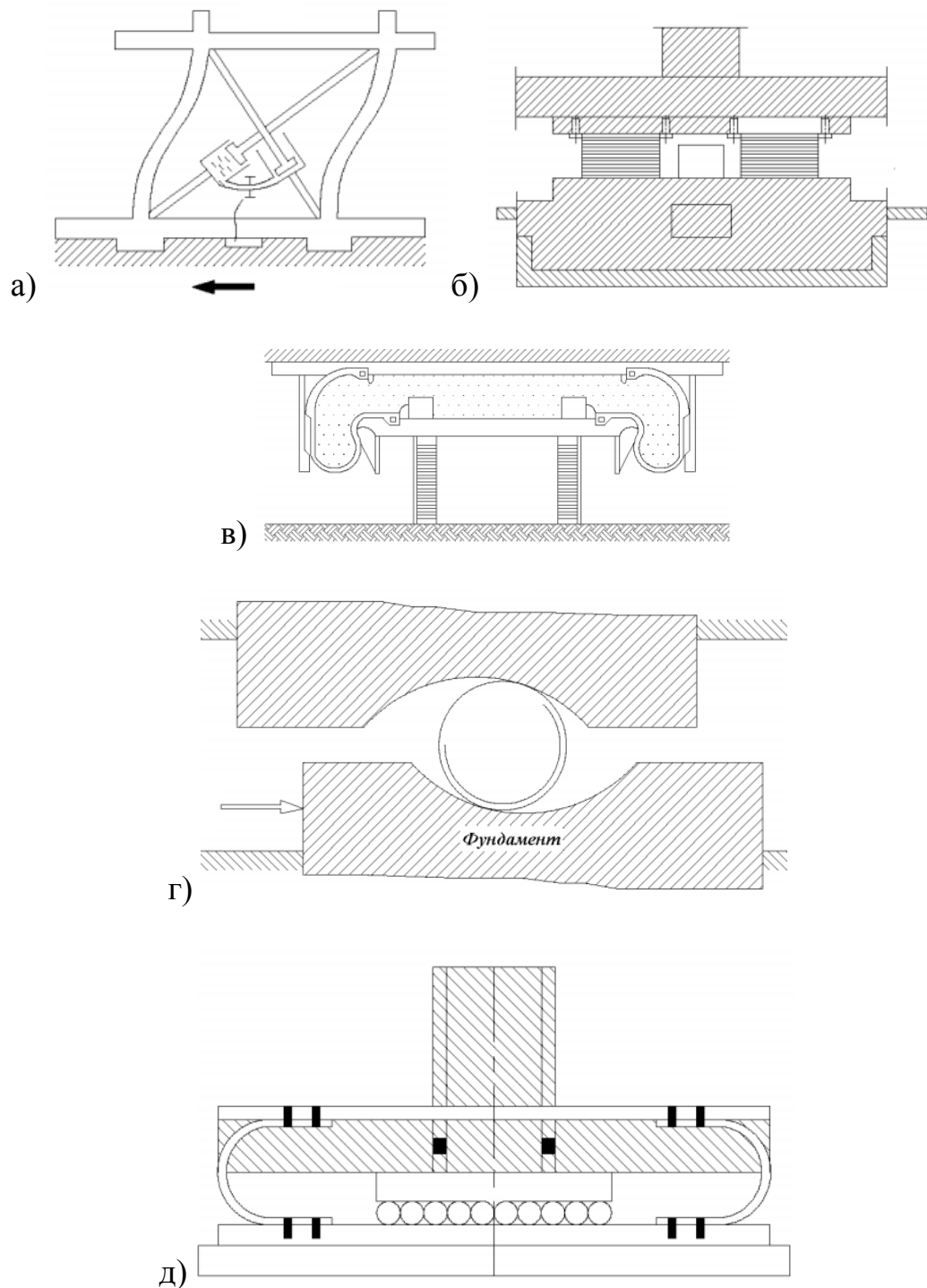


Рис. 2.10. Схеми активного сейсмосахисту місячного модуля:
 а - схема пристрою для зміни характеристик жорсткості та динамічних параметрів модуля; б - резинометалевий сейсмоізолятор;
 в - сейсмоізолятори з повітряною по душкою високого тиску;
 г-сейсмоізолятор із ковзними поясами з використанням ефекту тертя-ковзання

Нова мапа розподілу гравітації дозволяє вченим більш точно враховувати внутрішню структуру і склад Місяця. Карта гравітаційного поля

показує безліч деталей, таких як тектонічні структури, вулканічні форми рельєфу, кільця басейнів, центральні вершини кратерів та численні прості чашеподібні кратери. Дані також показують, що гравітаційне поле Місяця не схоже на поле будь-якої іншої планети земної групи у нашій Сонячній системі.

Гравітаційне поле Місяця зберігає запис про ударні бомбардування, які характеризували всі земні планетні тіла, і виявляє свідчення руйнування внутрішньої частини, що тягнеться на значну глибину від поверхні.

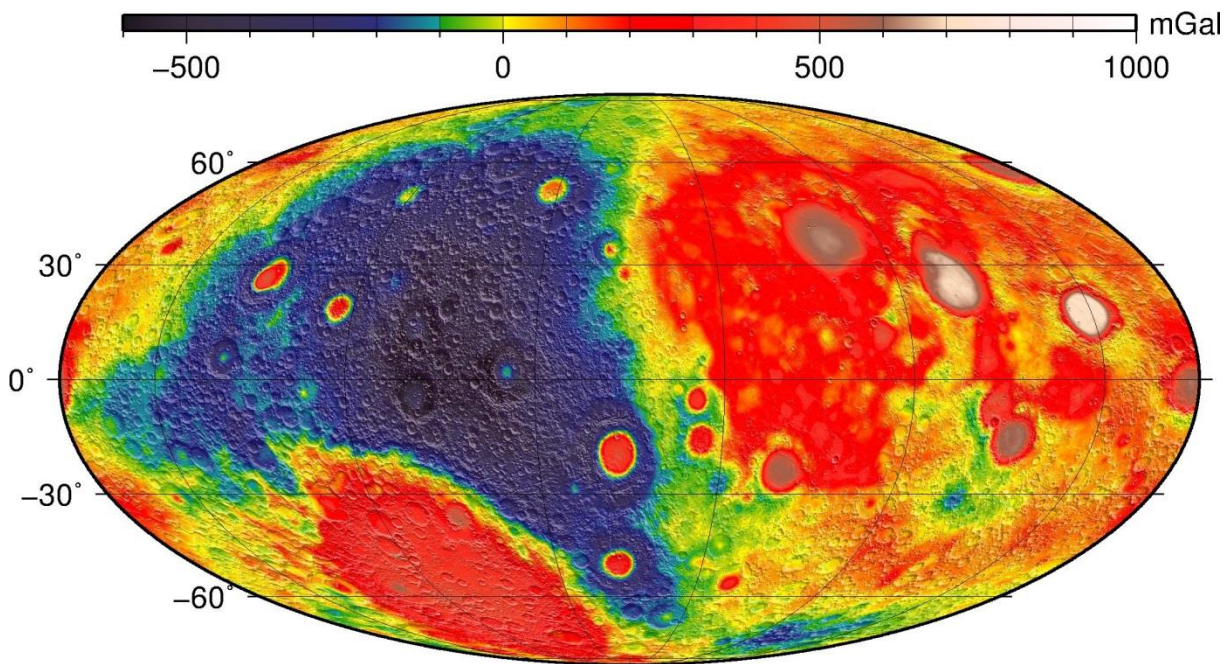


Рис. 2.11. Прискорення вільного падіння на поверхні Місяця

Місяць має середнє значення гравітаційного прискорення (прискорення вільного падіння) на поверхні близько 1.622 м/с^2 , що становить приблизно $1/6$ частину прискорення вільного падіння на поверхні Землі. Отже, об'єкти заданої маси будуть важити на Місяці приблизно в шість разів менше, ніж на Землі.

Оскільки Місяць, як і Земля, не є ідеальною однорідною сферою, відбувається деяка просторова зміна гравітаційного прискорення. Як видно з рис. 3, мінімальні і максимальні величини гравітаційного прискорення на поверхні Місяця відрізняються приблизно на $0,025 \text{ м/с}^2$, що становить трохи більше $1,5\%$ від середнього значення.

При наближенні на мапах гравітаційних полів помітні ділянки на поверхні Місяця, що відрізняються високою щільністю і мають більший гравітаційний ефект, ніж сусідні території. Це так звані маскони. Найчастіше маскони розташовані під місячними морями, що мають округлу форму.

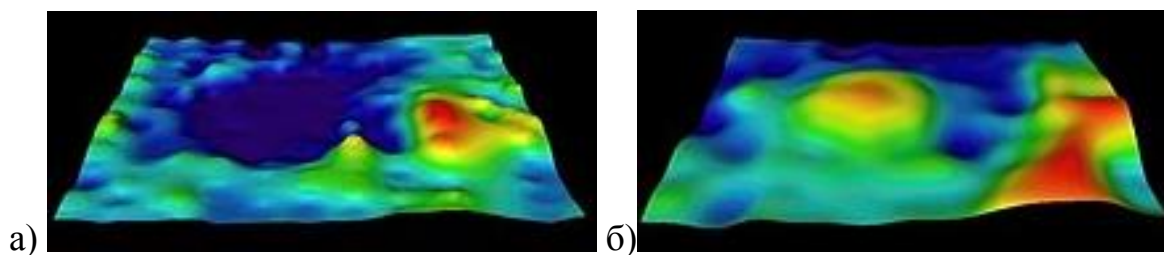


Рис. 2.12. Топографічне зображення (а) та гравітаційне поле (б) Місячного Моря Сміта, що містить значний маскон [12]

Зібрані космічними апаратами місії GRAIL дані дозволили уточнити походження масивних невидимих областей під поверхнею Місяця, які роблять нерівномірною силу тяжіння на Місяці і мають досить сильний вплив на траєкторії руху місячних орбітальних апаратів.

Вчені місії GRAIL виявляли маскони, комбінуючи дані про зміни місячної гравітації з розрахунками найскладніших комп'ютерних моделей. Ці моделі враховували безліч різних параметрів, включаючи місця ударів масивних астероїдів і відомі сьогодні дані про особливості геологічного розвитку супутника нашої планети.

Дані місії GRAIL підтвердили, що місячні маскони виникли тоді, коли великі астероїди або комети стикалися з давнім Місяцем, коли він був ще гарячим і його матеріал був пластичним. Удари астероїдів та інших космічних тіл руйнували тонку кору Місяця і змушували частини більш щільних порід мантиї Місяця, майбутні маскони, наближатися до її поверхні.

Місячний житловий модуль повинен проектуватися з урахуванням прискорення вільного падіння на Місяці, що призведе до ряду додаткових конструктивних проблем.

Порівняно низька сила гравітаційного прискорення на Місяці означає, що навантаження, які будуть діяти на конструкцію від власної ваги конструкції, ваги обладнання, захисного шару реголіту або інших матеріалів та елементів, будуть значно нижче. Це потенційно може призвести до зменшення маси опорної частини модуля (фундаменту), проте окремим фактором при проектуванні даного елемента буде внутрішній тиск від штучно створюваної «атмосфери».

Менша сила гравітації дозволяє будувати витягнуті структури, але вимагає забезпечення більше точок опори.

Система розгортання модуля повинна бути розроблена таким чином, щоб подолати вплив гравітації. Наприклад, через слабку гравітацію важко виконувати земляні роботи – обладнання тисне вниз, а його буде видавлювати вгору.

Також при проектуванні багатоповерхових модулів слід звертати увагу на забезпечення коректної роботи інженерних систем (водопроводів, каналізації тощо).

Крім того, гравітація буде мати великий вплив на рух астронавтів. Незважаючи на зменшення ваги (сила, з якою тіло діє на горизонтальну опору або вертикальний підвіс) на Місяці, маса (міра інертності тіла) залишається незмінною. Тому інерція, яка є опором тіла змінам руху і пов'язана з масою, а не з вагою, також залишається незмінною. Таким чином, астронавт, що переміщається по місячній поверхні, робить це за інших умов.

2.5. Магнітне поле

Місяць не має внутрішнього магнітного поля, яке можна спостерігати на Землі. Однак на його поверхні є локалізовані області розміром до декількох сотень кілометрів, де переважає дуже сильне магнітне поле. Це було показано замірами під час місії Аполлон.

На Землі, наявність сильного магнітного поля захищає від шкідливого випромінювання. На жаль, магнітне поле Місяця значно слабкіше земного, з максимальною загальною силою магнітного поля на поверхні Місяця близько 100 нТ. Для порівняння, сила магнітного поля на поверхні Землі коливається від 25 000 до 65 000 нТ.

Крім того, на відміну від магнітного поля Землі, поточне магнітне поле Місяця не є дипольним полем, створеним динамо-ефектом ядра. Замість цього магнітне поле Місяця майже повністю обумовлено магнетизмом місячної кори.

Існували дві гіпотези про намагніченість Місяця. Перша: магнітні поля з'являються на поверхні внаслідок зіткнення з іншими космічними тілами. Друга: причиною магнітних полів супутника є те, що Земля мала рідке ядро. Пізніше з'явилася нова гіпотеза: «протоземля» зіткнулася з іншою планетою і від неї відірвався шматок, який став її супутником Місяцем.

Відкриття намагнічених місячних порід під час місії Apollo привело до висновку, що намагнічувальні поля були присутні на Місяці в далекому минулому. Магнетизм місячної кори є результатом залишкової намагніченості магнітних матеріалів на поверхні Місяця або поблизу неї.

Як альтернатива можливо, що на безповітряному тілі, такому як Місяць, короточасні магнітні поля можуть виникати під час сильних ударних подій. На підтвердження цього було встановлено, що найбільші намагніченості місячної кори розташовані поблизу антиподів гігантських ударних басейнів.

Через відмінності в локальній намагніченості виникають магнітні поля. Ці магнітні аномалії мають розмір від декількох кілометрів до сотень кілометрів. Відмінності в локальній намагніченості можна віднести, крім усього іншого, до типу і кількості намагніченого матеріалу і міцності намагнічувального поля в той час, коли матеріал був намагнічений [93,94].

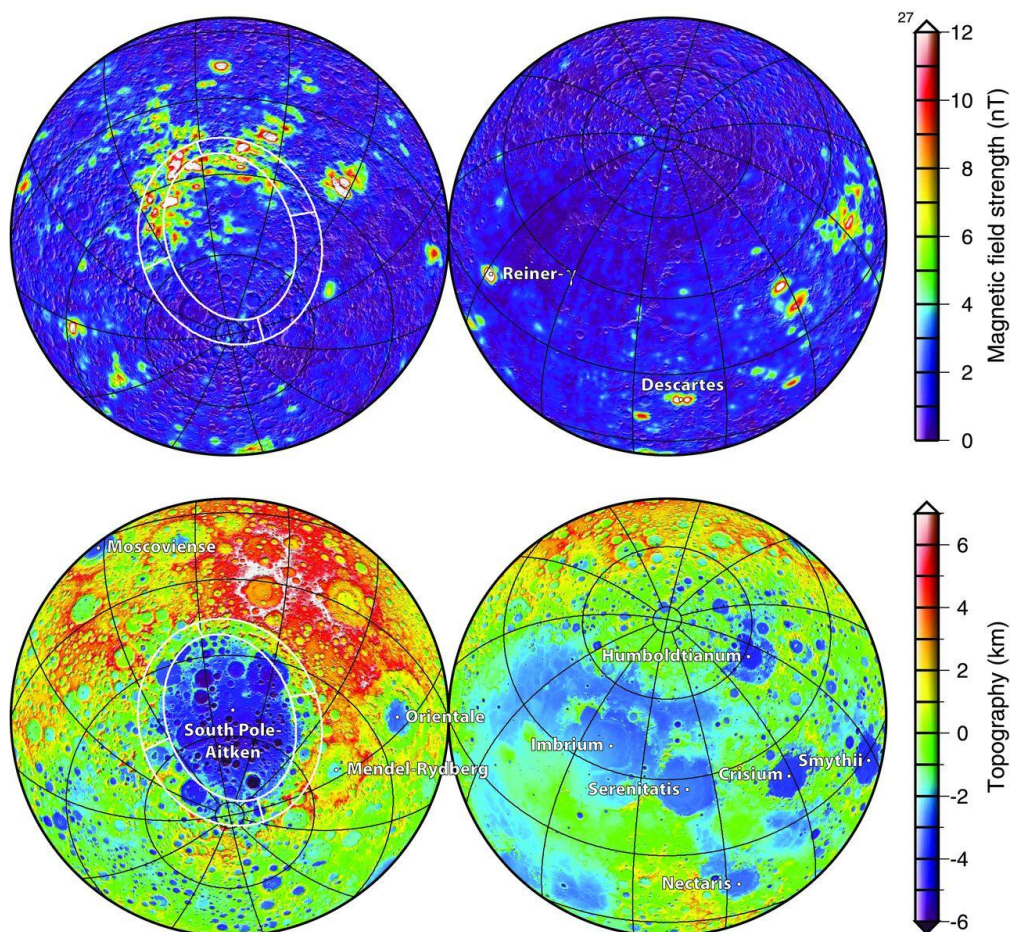


Рис. 2.13. Напруженість магнітного поля та топографія з центром у Південний полюс – басейн Ейткена (ліворуч) та протилежній півкулі Місяця (праворуч) [14]

Було виявлено, що багато ударних басейнів на Місяці були демагнітизовані. Це пов'язано з тим, що сильні удари викликають струси і високі температури, в результаті чого матеріал навколо зони удару нагрівається до надвисокої температури (температури Кюрі), що спричиняє фазовий перехід і призводить до втрати магнетизму. Таким чином, вплив на місячну поверхню також впливає на зміну місцевої намагніченості.

Незважаючи на обмежену силу магнітного поля на поверхні Місяця, були виявлені місцеві магнітосфери. Таке явище могло бути результатом вільного розширення створеної ударом хмари плазми в присутності навколишнього магнітного поля. Наприклад, космічний апарат Chandrayaan-1 наніс на карту "міні-магнітосферу" на Crisium на зворотній стороні Місяця. Міні-магнітосфера становить 360 км у поперечнику на поверхні та оточена областю посиленого потоку плазми товщиною 300 км, яка є результатом сонячного вітру, що обтікає міні-магнітосферу.

Однак, інформація стосовно локалізацій та формування міні-магнітосфери дуже обмежена через відсутність даних поблизу поверхні Місяця, а також через великий розкид параметрів плазми сонячного вітру.

Розуміння параметрів магнітного поля на місячній поверхні необхідне для визначення характеру взаємодії сонячного вітру з Місяцем і розподілу заряджених частинок на околиці.

Відсутність захисної магнітосфери означає, що рівні радіації на Місяці значно вище, ніж на Землі. Виявлені на Місяці міні-магнітосфери, навряд чи будуть корисні для забезпечення радіаційного захисту місячного модуля. Таким чином, заходи з радіаційного захисту повинні бути включені в перелік питань при розробці конструкції модуля для захисту екіпажу.

2.6. Атмосфера

Твердження про те, що атмосфера у Місяця відсутня, одночасно і правильне, і хибне. Щільної газової оболонки, здатної захистити поверхню від падіння метеоритів, а життя на ній від смертоносного космічного випромінювання, у нашого супутника немає. Але в нього є тонка та сильно розріджена газова оболонка, яку можна вважати атмосферою.

Щільність місячної атмосфери в 10 трильйонів разів менше, ніж атмосфери Землі. Щільність залежить від місячної «добі»: на освітленому сонцем денному боці біля поверхні місячного ґрунту концентрація іонів газу в 1 см³ становить 10⁴, а на темному нічному — 10⁵. Для нашої планети цей показник дорівнює $2,7 \times 10^{19}$.

В атмосфері Місяця немає повітря, його основу складають:

- молекули водню;
- іони гелію;
- іони метану;
- іони аргону;
- іони неону.

У 1991 р. у Місяця був виявлений невеликий розміром 15-20 радіусів натрієвий хвіст. Це відкриття дозволило зробити висновок про присутність у місячній атмосфері невеликої кількості іонів натрію та калію.

Американська космічна станція Lunar Prospector Orbiter (Місячний геолог) виявила у поверхні Місяця сліди радіоактивних ізотопів радону та полонію. Загальну масу газового прошарку Місяця вчені оцінюють у 25 000 кг.

Відсутність атмосфери робить Місяць вразливим перед жорстким космічним випромінюванням, здатним знищити всі форми життя на його поверхні.

Також без атмосфери вона схильна до великих температурних коливань. Освітлена Сонцем сторона супутника розігрівається до +127°C, але в неосвітленій температура становить 173°C нижче нуля.

На дні глибоких кратерів місячних вулканів, куди сонце ніколи не заглядає, температура опускається майже до абсолютного нуля – мінус 247 С.

Не маючи атмосфери, Місяць беззахисний перед метеоритною загрозою. Бомбардування її поверхні мікрометеоритами, які Землі повністю згорають, не досягаючи поверхні, на Місяці відбувається постійно.

Особливості атмосфери Місяця обумовлюють ще ряд викликів при проектуванні житлових модулів та поселень.

Довгі місячні ночі (завдовжки 354 години) означатимуть, що залежність від сонячної енергії буде неможлива ніде крім полярних областей. Крім того, значні коливання температури також вимагатимуть внесення змін у конструкції колоній. Будь-яке село на поверхні потрібно буде захистити і від сонячного випромінювання.

Відсутність атмосфери збільшує шанси на потрапляння метеоритів та вразливість до сонячних спалахів. Місяць також періодично проходить через магнітосферу Землі, створюючи плазмовий батіг, що розсікає поверхню. На світлому боці бомбардування електронів призводить до викиду ультрафіолетових фотонів та нарощування негативного заряду на темній стороні. Це теж тягне за собою деяку небезпеку для поселень на поверхні.

Низку цих питань можна було б вирішити за рахунок будівництва поселень під поверхнею. Але якщо припустити, що населені пункти залежатимуть від сонячної енергії, їх доведеться будувати поблизу полярних областей, щоб скористатися наявністю вічного світла у цих регіонах.

Особливий інтерес для інженерів, які планують місії на Місяць, представляє сильний вплив, який люди можуть мати на атмосферу. Кожна висадка Аполлона на Місяць виділяє вихлопні гази, які складають близько 20% від загальної маси місячної атмосфери. Це не тільки вплинуло на ранні вимірювання місячної атмосфери, але, що більш важливо, як показали дослідження, якщо в місячну атмосферу введуть достатню масу, це збільшить час виходу газів з атмосфери з днів до сотень років.

2.7. Місячний пил

Місячний пил, який є однією з основних небезпек для астронавтів, – це липка субстанція, здатна накопичувати електричний заряд. При тривалому впливі вона може виводити з ладу деталі скафандрів та оптичних приладів. Вдихання місячного пилу становить небезпеку здоров'ю астронавтів. Атмосфера Місяця регулярно забруднюється пиловими хмарами, що піднімаються з поверхні під впливом сонячного вітру. Через низьку гравітацію пильні хмари піднімаються досить високо (протягом місячного дня) і осідають на поверхню вночі. Їх можна спостерігати, коли Сонце знаходиться на обрії Місяця.



Рис. 2.14. Місячний пил

Місячний пил дрібний та має гострі краї та зазубрини. Пил цей утворюється при падінні на місячну поверхню метеоритів. Вони розжарюють і подрібнюють скельні породи та ґрунт, які містять кварц та залізо. А оскільки на Місяці немає вітру та води, щоб закруглити ріжучі краї, крихітні крупинки дуже гострі та мають зазубрини.

Місячний пил має й іншу проблемну особливість — розмір. Перемолотий мікрометеоритами, він набагато дрібніший за допустимі значення. Дихальна система людини успішно справляється з частинками більшими за 10 мікронів (приблизно 1/7 діаметра людського волосся). Місячна пил - дрібнодисперсна, з діаметром аж до 2 мікронів.

Місячний пил складається з безлічі сполук, які вступають у реакцію з клітинами людини: мінерали сприяють утворенню гідроксильних радикалів, які, у свою чергу, сприяють розвитку раку легенів.

Вплив поверхневої зарядки іонізуючою радіацією потребує таких рішень, як заземлення конструкції, нанесення спеціальних покриттів або використання реголітового екранування. Аналогічним чином, існують різні варіанти запобігання потраплянню місячного пилу в місячний модуль. Наприклад, замість шлюзу в дизайні можна використовувати порт для костюмів. Скафандр кріпиться до зовнішніх елементів конструкції, а астронавти можуть увійти в скафандр через люк, що з'єднує конструкцію з скафандром. Як тільки астронавт входить в скафандр, люк закривається, а скафандр від'єднується від конструкції модуля. Після завершення операцій

на поверхні Місяця астронавт з'єднає скафандр зі модулем і входить всередину через люк. Таке рішення, може значно зменшити кількість пилу, що надходить в житловий модуль. Інший варіант - використовувати стандартний шлюз і використовувати надлишковий тиск в модулі, щоб запобігти потраплянню пилу.

Незалежно від стратегій зменшення потрапляння пилу, цілком імовірно, що буде потрібна спеціальна система для очищення та видалення будь-якого пилу, який потрапляє в модуль. Така система призведе до додаткових навантажень на конструкцію, що вплине на вибір матеріалу і розміру (а значить і ваги і вартості) для конструкції..

Також необхідно забезпечувати зносостійкість та захист обладнання, оскільки відомі дані про руйнування та вихід із ладу приладів після тривалої взаємодії з місячним пилом.

2.8. Освітлення і температурний режим

Ключовими аспектами місячного середовища з точки зору перебування та життєдіяльності людини є освітлення і температура. Умови освітлення на місячній поверхні потрібно знати, щоб оцінити можливість використання природного світла для енергозабезпечення, вирощування рослин (повністю або як доповнення до штучного освітлення). Знання температурного середовища має вирішальне значення для забезпечення стабільної потрібної температури всередині модуля.

Подібно до дня на Землі, місячний день - це період часу, в якому Місяць робить один повний оборот навколо своєї осі. Місяць обертається навколо осі протягом приблизно 27 днів на Землі. Місячний день на одному боці місяця триває близько 13 з половиною земної доби, а потім 13 з половиною земної доби триває місячна ніч. Таким чином, місця на Місяці можуть безперервно освітлюватися протягом декількох (земних) днів.

Місяць має нахил своєї осі близько 1,54 градусів – набагато менше, ніж у Землі – 23,44 градуси. Це означає, що Місяць не має сезонів, подібних до Земних. Проте через нахил на місячних полюсах є місця, які ніколи не бачать денного світла.

Оскільки атмосфера Місяця вкрай розріджена, то основний вплив на температуру поверхні має ступінь її освітленості. Вдень атмосфера, розсіюючи сонячні промені, не допускає сильного прогрівання, а вночі зберігає тепло, захищаючи від переохолодження.

Умови освітлення

У поєднанні з топологією поверхні невеликий кут нахилу забезпечує різні умови освітлення в різних місцях на Місяці.

Для створення місячних поселень, особливий інтерес представляють полюси. Частини ударних кратерів на полюсах Місяця ніколи не освітлюються Сонцем, в той час як інші прилеглі ділянки місячної поверхні

піддаються впливу безперервного сонячного світла протягом декількох місяців і можуть бути освітлені до 89% на рік.

Оскільки завдяки сучасним дослідженням топографія Місяця визначається з більшою точністю, стає можливим точно передбачити умови освітлення на Місяці. За допомогою орбітальної техніки можна розрахувати положення Місяця, Землі і Сонця, що дозволяє визначити пряме і непряме (відбите Землею) сонячне світло, яке висвітлює задану область на Місяці. З урахуванням навколишньої топографії можна змодельовати часткове або повне блокування світла прилеглими поверхневими елементами.

Звичайно, такі моделі потрібно перевіряти, що вимагає порівняння прогнозованих значень з спостережуваними умовами освітлення. Майбутні дослідження, ймовірно, будуть використовувати більш повні і точні дані з місячного розвідувального орбітального апарату.

Використання бортових приладів для спостереження за місячною поверхнею дозволяє створювати карти освітлення Місяця. На рис. 2.15 зображено мапу освітлення Південного полюса Місяця, взяту з зображень, отриманих бортовими приладами.

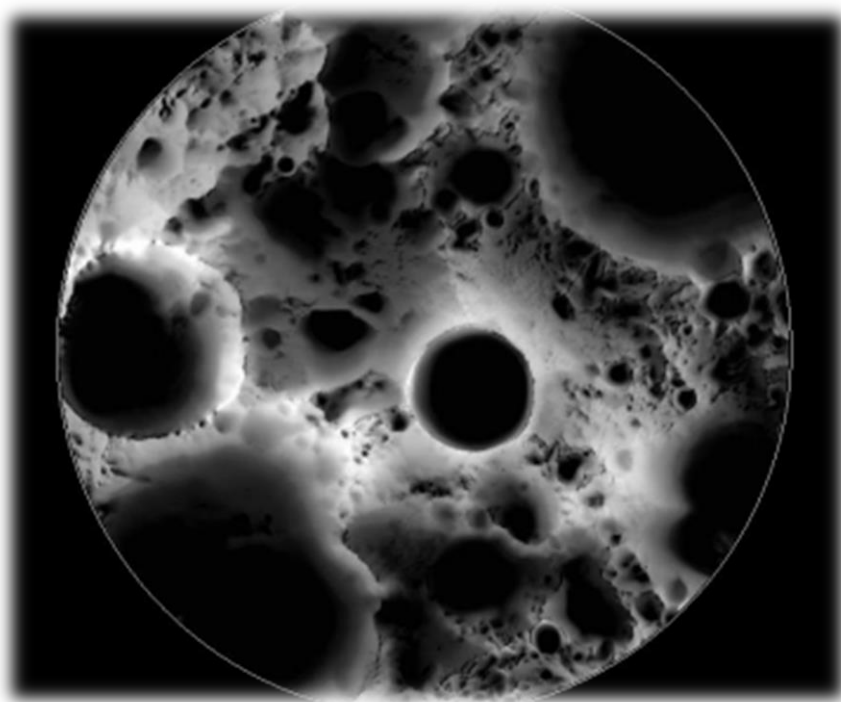


Рис. 2.15. Мапа освітлення Південного місячного полюса

Ця мапа освітлення поєднує в собі спостереження, зроблені протягом 6 місячних днів (приблизно шість земних місяців). Беручи до уваги освітлення кожного місця під час кожного спостереження, можна було скласти карту, що показує відносне освітлення за весь проміжок часу.

Температурний режим

Температура, що спостерігається в заданому місці, безпосередньо пов'язана з умовами освітлення. Наприклад, постійно затінені кратери холодніше, ніж навколишні райони, які отримують сонячне світло.

Без захисної атмосфери, яка зберігає тепло, температура на Місяці набагато екстремальніше, ніж на Землі.

На нічній стороні Місяця температура опускається до -173°C , а на стороні, зверненій до Сонця, вона може досягати $+127^{\circ}\text{C}$ в залежності від ступеня освітленості. Температура місячних порід на глибині 1 метр постійна і становить -35°C . На рис. 3.3 показані максимальна денна (ліворуч) та мінімальна нічна (праворуч) температури на поверхні Місяця.

Мінімальні температури спостерігаються біля полюсів супутника на дні кратерів. Так як нахил місячної осі до площини екліптики лише півтора градуси, туди ніколи не доходить сонячне світло. У кратерах у районі Північного полюса зареєстрована температура -249°C , що близько до значення абсолютного нуля.

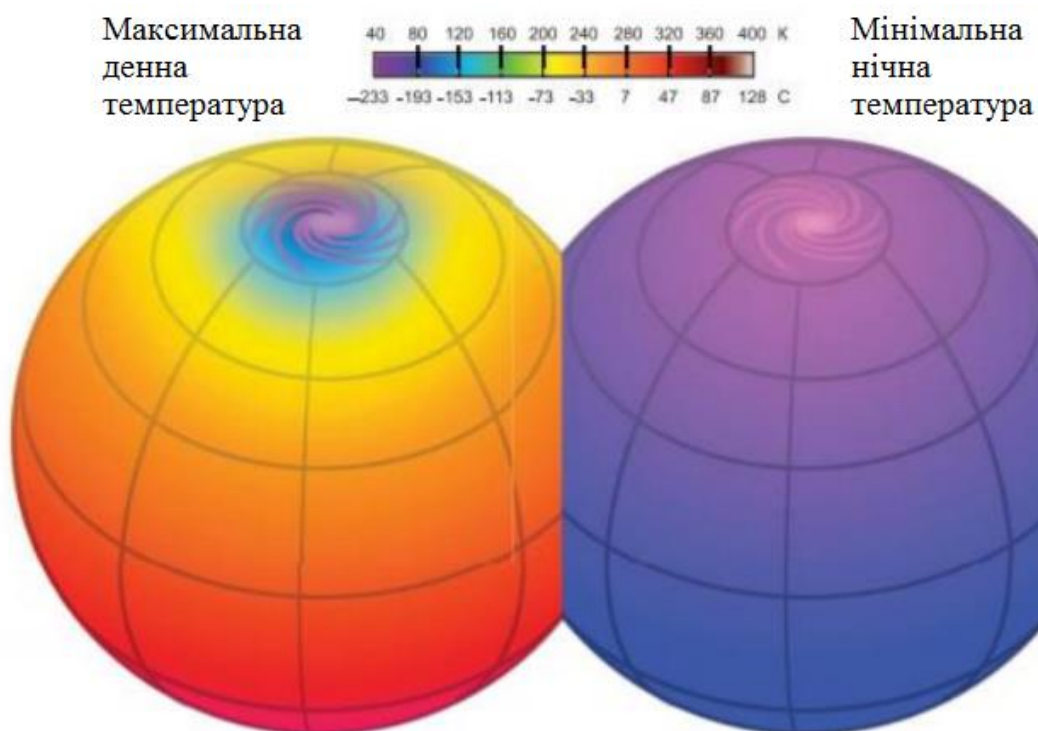


Рис. 2.16. Максимальна денна (ліворуч) та мінімальна нічна (праворуч) температури на поверхні Місяця

Під час повних сонячних затемнень, які тривають півтори години, температура за цей проміжок часу падає на $250-300^{\circ}\text{C}$ і потім швидко піднімається до попередніх значень.

Основним джерелом тепла для місячної поверхні є пряме сонячне випромінювання. Потужність сонячного нагріву поверхні Місяця залежить

від поглинання матеріалу місячного реголіту, а також від потужності сонячного випромінювання на основі розташування Місяця на орбіті. Потужність сонячного випромінювання (G_s) на одиницю площі, що падає на місячну поверхню, може змінюватися від максимального значення 1450 Вт/м^2 в місячний полудень до мінімального значення 0 Вт/м^2 протягом ночі.

Конструкції житлового модуля повинні бути забезпечені необхідною надійністю від виникнення всіх видів граничних станів розрахунком з урахуванням несприятливого впливу температурного режиму Місяця. При цьому повинні бути виконані технологічні вимоги при виготовленні конструкцій з урахуванням впливу циклічної зміни, високих та низьких температур зовнішнього середовища та дотримані вимоги щодо експлуатації та термостійкості.

Таблиця 2.9 - Теплові параметри місячної поверхні

Параметр	Величина
Поверхнева поглинальна здатність	0,87
Потужність сонячного випромінювання	1450 Вт/м^2
Площа поверхні	$2,25 \text{ м}^2$
Сонячний кут падіння	Варіюється від 0 до 90 градусів
Внутрішня потужність нагрівання	$0,031 \text{ Вт/м}^2$
Поверхнева випромінювальна здатність	0,97
Константа Стефана-Больцмана	$5,67\text{e-}8 \text{ Вт/м}^2\text{K}^4$
Відбивна здатність поверхні	0,13

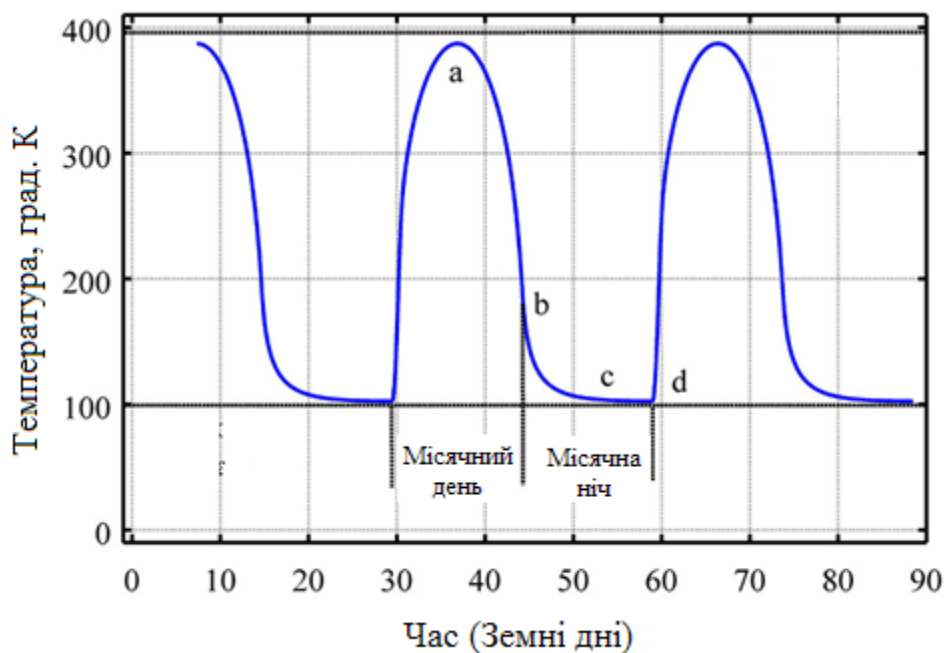


Рис. 2.17. Температура місячної поверхні протягом усього місячного циклу [8]

Чинники довкілля – температура та освітленість - присутні на поверхні Місяця, створюють одні з найскладніших проблем для успішного довгострокового поселення людей Місяці, викликаючи необхідність використання гібридних або штучних систем освітлення.

Використання додаткового обладнання збільшує навантаження на конструкцію модуля.

Щоб підтримувати температуру повітря в приміщенні в межах потрібного діапазону, конструкція модуля повинна включати шари ізоляції, а також систему опалення та охолодження. Шари утеплювача призводять до збільшення товщини стіни, що позначиться на об'ємі несучої конструкції. Системи опалення та охолодження збільшать масу обладнання і, як і система штучного освітлення, потребуватимуть додаткових матеріалів (проводів і силових інтерфейсів). Залежно від типу використовуваної системи термоменеджменту для циркуляції рідини через систему можуть знадобитися резервуари і насоси для перекачування теплоносія, а також радіатори для розподілення тепла.

2.9. Випромінювання

На Місяці немає сильного магнітного поля і товстої атмосфери, яка захищає поверхню від руйнівного випромінювання. Слід зазначити, що Місяць проходить через геомагнітний хвіст Землі і тому частково захищений магнітним полем Землі протягом декількох днів щомісяця. Однак є деякі сумніви щодо того, як це впливає на рівень радіації на поверхні Місяця. У

будь-якому випадку місячний модуль повинен мати певний радіаційний захист, щоб забезпечити належні умови для астронавтів і рослин.

Для коректного проектування антирадіаційного екранування, необхідно розуміти джерела та властивості випромінювання. Випромінювання, що впливатиме на людину та штучні споруди на Місяці, можна розділити на чотири джерела:

- місячне випромінювання;
- сонячне випромінювання;
- галактичне випромінювання;
- вторинне випромінювання, що виникає в результаті відображення інцидентного (первинного) опромінення об'єкта.

Були також виявлені деякі інші вторинні джерела заряджених частинок, такі як магнітосфери Юпітера і Землі, але через низький потік і низьку енергію частинок з цих джерел, а також через обмежені характеристики вони не вважаються впливовими.

Перш ніж детально обговорити різні джерела випромінювання на Місяці, необхідно коротко розглянути різні одиниці дози опромінення.

Доза опромінення може бути виражена або як поглинена доза, яка враховує тільки енергію випромінювання, поглинену на одиницю маси, або як еквівалентну дозу, яка враховує шкоду, яку різні заряджені частинки можуть завдати матеріалу (особливо живій тканині).

Пов'язані з поглиненою дозою є одиниці грей (Гр) і ради. 1 Гр - це така доза, при якій масі 1 кг передається енергія іонізуючого випромінювання в 1 джоуль. Позасистемною одиницею поглиненої дози є рад. При цьому $1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$.

Одиницею вимірювання еквівалентної дози є зиверт (Зв). Величина 1 Зв дорівнює еквівалентній дозі будь-якого виду випромінювання, поглиненого 1 кг біологічної тканини і створює такий самий біологічний ефект, як і поглинена доза в 1 Гр фотонного випромінювання. Позасистемною одиницею вимірювання еквівалентної дози є бер. $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бер}$.

Зв'язок між одиницям зиверт, грей, бер і рад заснований на ваговому коефіцієнті, також відомому як коефіцієнт якості або коефіцієнт біологічного пошкодження, для різних частинок випромінювання. Цей коефіцієнт є співвідношенням між пошкодженням, заподіяним частинкою конкретного типу, і пошкодженням, викликаним гамма-випромінюванням. Для нейтронів і важких іонів коефіцієнт коливається від 5 до 20. Перетворення з Гр в Зв - це просто множення поглинених доз різних типів випромінювання на відповідні коефіцієнти.

Максимально допустима доза на Землі становить 50 мЗв/рік для працівників радіаційно небезпечних підприємств і 5 мЗв/рік для звичайної людини. Стандарти ESA встановлюють межу 1 Зв протягом всього терміну праці і максимальну дозу опромінення 0,5 Зв/рік на кровотворні органи.

Місячне випромінювання.

Кожен об'єкт і матерія у Всесвіті виділяє деяке випромінювання, включаючи Місяць. Хоча, як правило, таке випромінювання є нешкідливим, існують деякі радіоактивні елементи в місячному реголіті, які роблять незначний внесок у радіаційне середовище.

Зокрема, Місяць містить радіонукліди калій-40, уран-235 і уран-238) і торій-232, які виробляють комбіновану дозу випромінювання 0,3 мЗв/рік.

Крім того, хоча технічно випромінювання не місячне за походженням, є частина випадкового сонячного і галактичного випромінювання, яке відбивається з поверхні Місяця, що було підтверджено на основі спостережень з програми Interstellar Border Explorer [10]. Ця місія дозволила визначити співвідношення кількості відбитих енергетично нейтральних атомів до падаючих частинок сонячного вітру, яке становило $0,09 \pm 0,05$.

Результати дослідження нейтронів з поверхні Місяця свідчать про те, що до 18% ефективної дози галактичного космічного випромінювання виникає внаслідок багаторазового розсіювання в середовищі. Для випадку SEP альbedo було виявлено близько 2,4% від ефективної дози [10].

Сонячне випромінювання

Сонячне випромінювання складається з частинок сонячного вітру і сонячної енергії, пов'язаних з сонячними спалахами. Сонячний вітер - потік іонізованих частинок (в основному гелію-водневої плазми), який виділяється із сонячної корони зі швидкістю 300–1200 км/с у навколишній простір у всіх напрямках. Сонячний вітер безперервно випромінює електрично нейтральну плазму і має типову швидкість в діапазоні від 300 до 800 км/с.

Плазма складається з іонів і електронів, з середньою енергією приблизно 1 кеВ/нуклон для іонів і енергій порядку 100-102 еВ (електронвольт) для електронів. Щільність сонячного вітру змінюється в залежності від сонячної активності.

Сонячний вітер можна розділити на різні типи:

1 - Повільний сонячний вітер породжується «спокійною» частиною сонячної корони при її газодинамічному розширенні: при температурі корони бл. 2×10^6 К корона не може перебувати в умовах гідростатичної рівноваги, і це розширення за даних граничних умов повинно приводити до розгону корональної речовини до надзвукових швидкостей. Нагрівання сонячної корони до таких температур відбувається внаслідок конвективної природи теплопереносу у фотосфері сонця: розвиток конвективної турбулентності в плазмі супроводжується утворенням інтенсивних магнітозвукових хвиль; у свою чергу при поширенні в напрямку зменшення густини сонячної атмосфери звукові хвилі перетворюються в ударні; ударні хвилі ефективно поглинаються речовиною корони і нагрівають її до температури 1 - 3×10^6 К.

2 - Швидкий сонячний вітер. Потoki рекурентного швидкого сонячного вітру випромінюються Сонцем протягом декількох місяців і мають період повторюваності при спостереженні із Землі в 27 діб (період обертання Сонця). Ці потоки асоційовані з корональними дірами — областями корони з

відносно низькою температурою (приблизно $0,8 \times 10^6$ K), зниженою густиною плазми (всього чверть густини спокійних областей корони) і радіальним відносно Сонця магнітним полем.

3 - Високошвидкісні потоки. Спорадичні потоки при русі в просторі, заповненому плазмою повільного сонячного вітру, ущільнюють плазму перед своїм фронтом, утворюючи ударну хвилю, що рухається разом із ним. Спорадичні високошвидкісні потоки в сонячному вітрі обумовлені корональними викидами.

Сонячний вітер складається переважно (> 95%) приблизно однакової кількості електронів і протонів, але також були виявлені іони більшості хімічних елементів (наприклад, ізотопи гелію, азоту та кисню). Крім того, було виявлено, що близько 2% сонячного вітру складають альфа-частинки, які мають 2 протони і 2 нейтрони, а також присутні високоенергетичні фотони (наприклад, рентгенівські і гамма-промені).

Потік частинок на поверхні Місяця в середньому становить близько $108\text{--}109$ протонів/см²·с. Низька енергія частинок сонячного вітру означає, що частинки не проникатимуть в матеріали дуже глибоко (10^{-8} см в місячному реголіті) і становлять невеликий ризик для астронавтів. З іншого боку, частинки сонячної вітру мають значно більш високі енергії, як правило, в діапазоні від 1 до 100 MeV/нуклон, що принаймні в 1000 разів перевищує енергію інших частинок. Інтенсивність потоку протонів в залежності від кінетичної енергії частинок сонячної вітру для шести різних періодів приведена на рис. 2.18.

Виходи СЕП пов'язані з раптовими сплесками сонячної активності у вигляді сонячних спалахів та викидів корональної маси (СМЕ). На основі основного методу прискорення матерії може бути зроблено відмінність між «імпульсивними» та «поступовими» подіями СЕП.

Галактичне випромінювання

Ще одним важливим джерелом випромінювання на поверхні Місяця є сам космос. Галактичне космічне випромінювання походить від залишків наднових зірок, що утворюються в результаті потужного вибуху на останніх етапах еволюції масивних зірок, які або перетворюються на чорні дірки, або руйнуються. Енергія, що виділяється при цих вибухах, прискорює заряджені частинки за межами нашої Сонячної системи, через що вони набувають дуже високої проникаючої здатності, а їх екранування стає надзвичайно важким завданням. Місяць постійно піддається впливу галактичного космічного випромінювання.

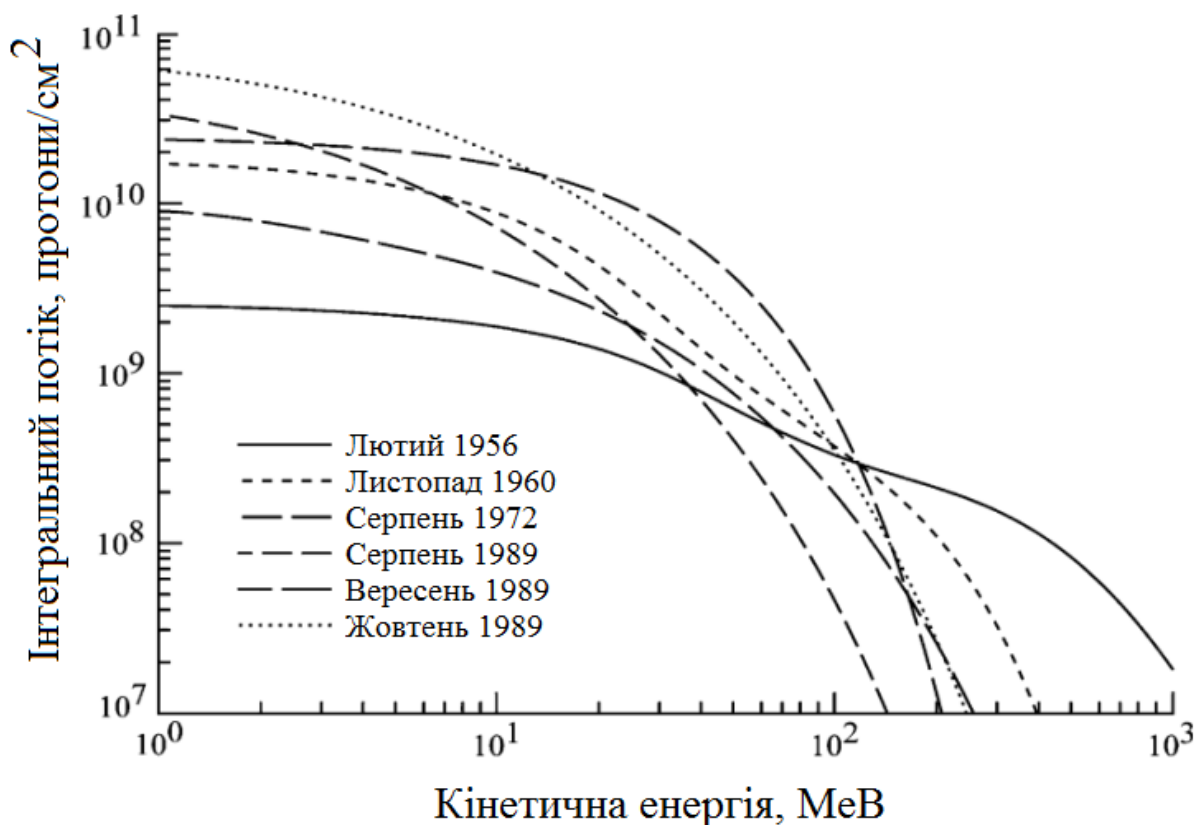


Рис. 2.18: Інтенсивність потоку протонів в залежності від кінетичної енергії частинок сонячної вітру для шести різних періодів

Галактичне космічне випромінювання має більш низький потік, ніж сонячне випромінювання, але воно складається з частинок, які є більш шкідливими для тканин людини.

Галактичне випромінювання складається з 2% електронів, приблизно 85% протонів, $\sim 12\%$ альфа-частинок, а решта 1% складається з іонів більшості хімічних елементів. Потік галактичного випромінювання на місячну поверхню не постійний, а змінюється в результаті взаємодії з сонячним вітром і частинками сонячної енергії.

На рис. 31 показаний взаємозв'язок між щільністю потоку частинок на поверхні Місяця і енергією частинок для різних компонентів галактичного випромінювання. «Z» - атомне або протонне число, а «а.о.м.» - атомна одиниця маси і має значення $1.660538782(83) \cdot 10^{-27}$ кг. Суцільні лінії відображають випромінювання під час сонячного мінімуму 1977 року, а пунктирні лінії – під час сонячного максимуму 1990 року.

Вторинне випромінювання

Коли заряджені частинки проходять через матеріал, енергія через зіткнення передається від самих частинок до навколишнього матеріалу. Це може призвести до ряду різних взаємодій (наприклад, розсіювання Комптона, генерація пар електронів), що призводить до вторинного випромінювання

[10]. Частинки, які таким чином вивільняються з матеріалу, потенційно можуть продовжувати взаємодіяти з іншими атомами і молекулами.

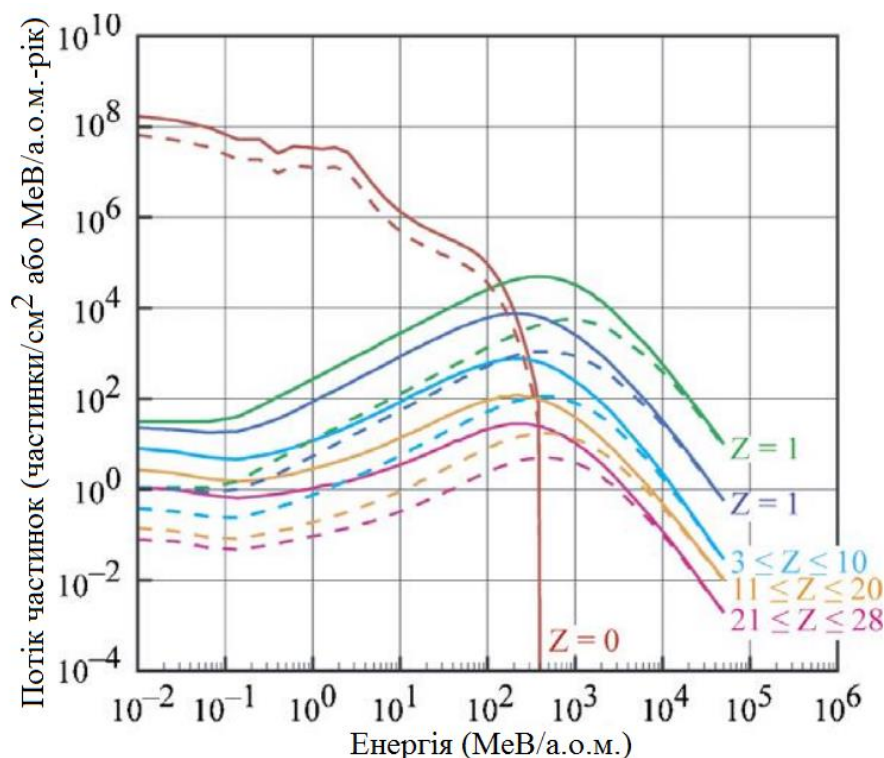


Рис. 2.19. Взаємозв'язок між щільністю потоку частинок на поверхні Місяця і енергією частинок для різних компонентів галактичного випромінювання

Таким чином, освоєння Місяця людиною пов'язане із значними ризиками для космонавтів через космічне випромінювання. На поверхні Місяця це пов'язано з постійним впливом галактичних космічних променів та спорадичними явищами сонячних частинок. Взаємодія цього радіаційного поля з місячним ґрунтом призводить до третього компонента, що складається з нейтральних частинок, тобто нейтронів та гамма-випромінювання.

Останні дані щодо радіаційного фону на Місяці.

В рамках експерименту «Нейтрони та дозиметрія місячного модуля» на борту китайського посадкового модуля Chang'E 4 були вперше проведені виміри радіаційного впливу як заряджених, так і нейтральних частинок на поверхню Місяця. Було виміряно середню потужність поглиненої дози $13,2 \pm 1$ мкГр/годину та потужність дози нейтральних частинок $3,1 \pm 0,5$ мкГр/годину [12].

Вплив космічної радіації є одним з основних ризиків для здоров'я космонавтів, оскільки постійний вплив галактичних космічних променів (ГКЛ) може мати віддалені наслідки для здоров'я, такі як провокування катаракти, раку або дегенеративних захворювань центральної нервової системи чи інших систем органів. Більше того, вплив великих сонячних частинок у ситуації з недостатнім захистом може спричинити серйозні гострі

наслідки. Вплив ГКЛ неминучий, але зазвичай дає низьку потужність дози в порівнянні зі спорадичними, непередбачуваними, але іноді дуже інтенсивними сонячним випромінюванням, в яких енергетичні частки прискорюються за рахунок сонячних спалахів та коронарних викидів маси. Нуклонна складова ГКЛ складається в основному з протонів (~87%), гелію (~12%) та більш важких ядер (~1%). Ці ядра мають дуже високу енергію і тому мають високу проникаючу здатність. Через свій єдиний заряд протони іонізуються слабо, а ядра гелію мають вчетверо більшу іонізуючу здатність. 1% ядер, що залишаються, є елементами з високим (H) атомним номером (Z) і енергією (E) (загальне позначення - HZE), які вносять непропорційний внесок у радіаційне пошкодження відповідно до квадрату їх ядерного заряду Z, що призводить до дуже щільної іонізації. Через фрагментацію ядер та інших складних взаємодій з речовиною їх точне вплив на людей неясно, але може бути значним.

Для оцінки радіаційного впливу детекторними системами модуля Chang'E була виміряна величина поглиненої дози, D.

Поглинена доза являє собою відношення енергії (E; зазвичай вимірюється в кілоелектронвольтах кеВ), отриманої кремнієвим детектором, і маси, m, детектора і виражається в одиницях Грей (Гр = Дж/кг). Поділ на час накопичення дає виміряну потужність дози, виражену в Гр/годину.

Використовуються комбінація двох детекторів, з яких один вимірює розподіл енергії, щоб отримати спектр лінійної передачі енергії (зазвичай в одиницях кеВ мікрометр (кеВ/мкм)). Цей спектр поєднується з так званими факторами якості Q, що використовуються як біологічні ваги для отримання еквівалента дози H, який своєю чергою виражається в одиницях зіверта (Sv = Дж/кг).

Точні процедури такого вимірювання визначено Міжнародною комісією з радіаційного захисту. Людське тіло не зроблено з кремнію. Тому для того, щоб вимірювані потужності дози було можливо порівняти з використовуваними в земних умовах, отримані значення перетворюються у відповідні кількості для води, використовуючи постійний коефіцієнт перетворення дози 1.30.

Середня потужність сумарної дози в датчику на кремнії $13,2 \pm 1$ і $3,1 \pm 0,5$ мкГр/годину. Отримана середня потужність поглиненої дози від заряджених частинок в рамках експерименту модуля Chang'E 4 становить $10,2 \pm 1,1$ мкГр/година. Після перерахунку спектра лінійна передача енергії в кремнії на передачу у воді, було отримано середній коефіцієнт якості $Q=4,3 \pm 0,7$. Після множення виміряної потужності поглиненої дози заряджених частинок (у воді), наведеного вище, на середній коефіцієнт якості, авторами було отримано потужність еквівалентної дози галактичних космічних променів $57,1 \pm 10,6$ мкЗв/год. Зведення значень, що обговорюються у цьому параграфі, наведено у Таблиці 2.10.

Місячний посадковий модуль виміряв середню еквівалентну дозу 1369 мкЗв/день на поверхні Місяця. Для порівняння еквівалент дози на борту Міжнародної космічної станції (МКС), виміряний приладами DOSIS 3D

DOSTEL, склав 731 мкЗв/день із додатковим випромінюванням галактичних космічних променів 523 мкЗв/день. Додаткові ~208 мкЗв/день пов'язані з протонами при перетині Південно-Атлантичної аномалії.

Таблиця 2.10 - Зведення вимірювань потужності дози випромінювання, виміряної в мкГр/год. на поверхні Місяця

Швидкість дози (мкГр/рік)	Виміряна	Фонова	Загальна
Загалом	18.4 ± 0.4	5.2 ± 0.6	13.2 ± 0.7
Нейтральних часток	4.7 ± 0.1	1.7 ± 0.5	3.1 ± 0.5
Заряджених часток	13.7 ± 0.4	3.5 ± 0.8	10.2 ± 0.9

Таким чином, добова еквівалентна доза випромінювання на поверхні Місяця приблизно в 2.6 разів вище, ніж доза всередині МКС. Отримана потужність дози галактичного випромінювання, зазначена авторами, може розглядатися як верхня межа в умовах низької сонячної активності.

Поселення на Місяці забезпечать додатковий захист, за рахунок покриття шарами місячного реголіту. На рис. 32 показаний потік первинного галактичного випромінювання, а також частинок вторинного випромінювання в залежності від глибини місячного реголіту. Видно, що потік вторинних протонів, нейтронів та гамма-променів вищий, ніж первинний потік, а також не зменшується швидко зі збільшенням глибини реголіту. Таким чином, випромінювання, що впливатиме на екіпаж місячного модуля, покритого місячним реголітом, здебільшого складатиметься з вторинного випромінювання.

2.10. Метеороїди

Без щільної атмосфери місячна поверхня постійно піддається впливу метеороїдів, які розривають поверхневі шари місячного реголіту, створюють викиди пилових шлейфів, розплавляють, випаровують та іонізують різні елементи. Як вже говорилося раніше, ці процеси формували та утворювали складну поверхню Місяця.

Дослідження місячних кратерів показали, що в деяких випадках внаслідок падіння метеороїду, маса, викинута в результаті початкового удару, відповідала за утворення додаткових кратерів поблизу.

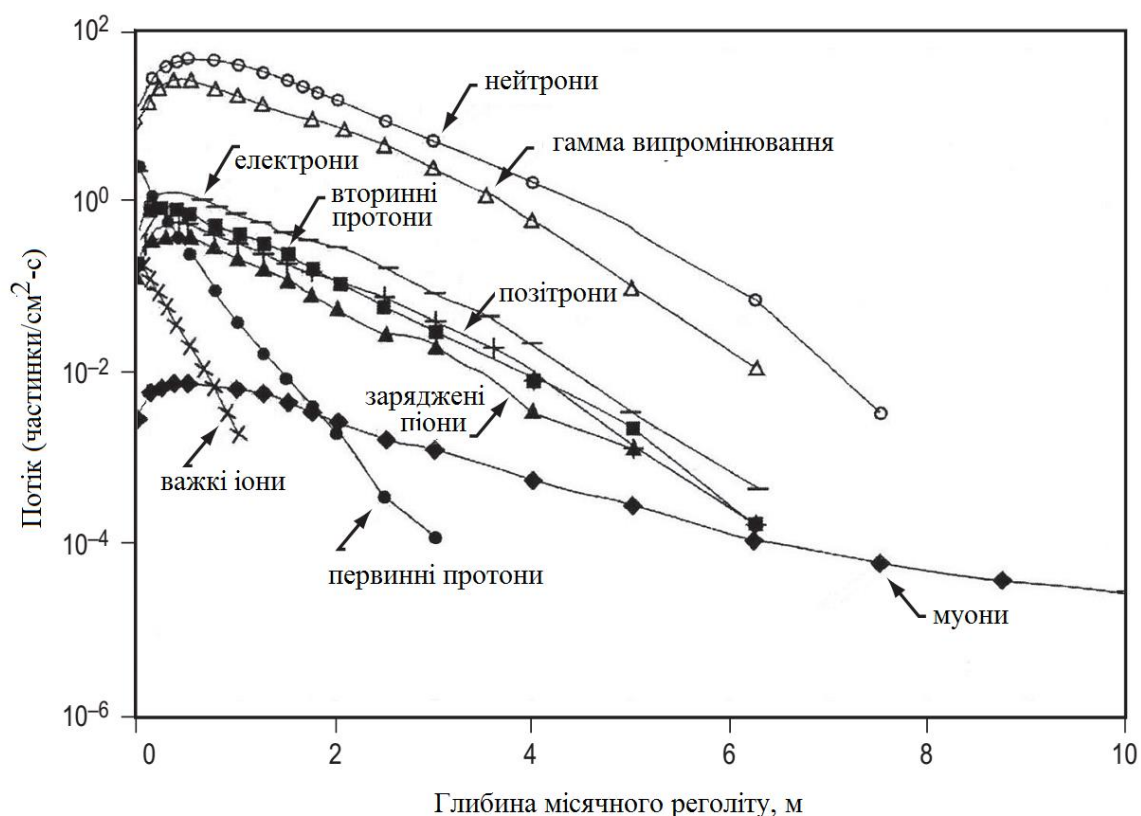


Рис. 2.20. Потік первинного галактичного випромінювання і вторинного випромінювання в місячному реголіті

Вплив метеороїдів, що падають на Місяць, буде важливими на всіх етапах будівництва, впливаючи на структури, призначені для укриття житлових модулів, споруд обладнання та ін. Тому метеоритне середовище має бути добре вивченим, щоб включати в проекти місячних структур відповідні захисні заходи.

Джерела походження метеороїдів. Місячні метеороїди походять із трьох джерел: комет, астероїдів та міжзоряного сміття. Уламки астероїдів зазвичай великі та щільні, а міжзоряні частинки надзвичайно малі; обидва дуже рідкісні.

Ці метеороїди кометного походження є найбільш поширеними, складаючи більшу частину потоку метеороїдів на Місяці, і вони будуть враховані під час проектування місячних структур.

Кометні метеороїди можуть виникати спорадично або в потоках. Спорадичні метеороїди — це осколки, які відриваються від комети і викидаються з орбіти комети гравітаційними і радіаційними силами, а також зіткненнями з іншими частинками. Ці метеороїди випадковим чином викидаються з орбіти комети і створюють відносно рівномірний потік метеороїдів, що впливають на Місяць. Спорадичний потік метеоритів є основною проблемою для місячних структур, оскільки він становить більшу частину метеороїдного середовища. Це особливо вірно на етапах перший і

другий, коли місії можуть бути приурочені так, щоб уникнути найбільш значущих метеорних потоків.

Коли комети проходять поблизу системи Земля-Місяця, частки відриваються від них потоками, прибуваючи групами, щоб бомбардувати Місяць. Щороку відбувається безліч метеороїдних потоків, хоча деякі з них дуже впливають на загальний потік. На рис. 3.2 показана сума максимальних факторів, за допомогою яких деякі з основних потоків можуть збільшуватися в певні дні року. Крім того, деякі потоки мають більш тривалий період, протягом якого вони створюють більший ефект; наприклад, потік метеороїдів з Леонідів [14] збільшується до максимуму кожні 33 роки.



Рис. 2.21. Сумарні коефіцієнти потоку для основних метеороїдних потоків [14]

Хоча метеороїдні дощі можуть збільшити потік метеороїдів у певний час, вони мають лише незначний вплив на загальний середній потік метеоритів. Основні потоки, які сприяють збільшенню метеороїдних імпактів, включають Квадрантиди, Аквариди, Персеїди, Оріоніди, Леоніди та Гемініди. Ці та інші важливі метеоритні бурі, а також пора року, в яку вони відбуваються, і фактор, за допомогою якого вони можуть збільшити спорадичний потік метеоритів, включені в Табл. 3.1. Наприклад, загальний потік під час проходження Леонідів буде до 1,9 рази більше спорадичного потоку.

Споруди для короткострокового використання на Місяці можуть бути сплановані таким чином, щоб уникнути максимальних потоків метеороїдів, особливо у періоди їхнього піку. При аналізі використовується модель сумарного середнього потоку метеороїдів.

Характеристики потоку метеороїдів. Важливим технічним аспектом зіткнення метеороїдів з Місяцем є розуміння характеристик потоку місячних метеороїдів та пов'язаних з ними подій на місячній поверхні. Модель потоку місячних метеороїдів може бути отримана за допомогою різних методів, таких як сейсмічні експерименти, фотографічні вимірювання та аналіз даних колекторів метеороїдів [15].

Таблиця 2.11 – Метеоритні бурі

Потік	Дати активності	Коефіцієнт потоку (F)	Швидкість, км/с
Квадрантиди	3 січня	9	41
Ліриди	20-22 квітня	1,85	45
η -Аквариди	25 квітня – 13 травня	3,2	69
δ -Аквариди	19 липня – 7 серпня	2,5	41
Персеїди	8 – 14 серпня	6	59
Південні Тавриди	26 жовтня – 20 листопада	1,6	-
Оріоніди	15 – 24 жовтня	2,2	-
Північні Тавриди	19 жовтня – 2 грудня	1,4	-
Леоніди	14 – 18 листопада	1,9	71
Гемініди	10 – 16 грудня	5	-
Урсиди	21 – 23 грудня	3,5	33

Примітка. Загальний потік = F x Спорадичний потік.

На рис. 2.22 показано декілька моделей метеороїдів, розроблених з використанням цих методів. Графік показує, що в логарифмічній шкалі потік метеороїдів поступово зменшується зі зростанням швидкості до маси приблизно 10^{-6} г, після чого потік зменшується інтенсивно. Тому менші частинки, які найчастіше впливають на Місяць, є основною проблемою при проектуванні місячних структур.

Аналіз потоку з точки зору діаметра частинок дає трохи іншу криву. Згідно з кількома джерелами, щільність метеороїдів насправді змінюється залежно від маси.

Якщо щільність метеороїдів менше 10^{-6} г насправді становить близько 2 г/см^3 , щільність метеороїдів між 10^{-6} та 10^{-2} г становить 1 г/см^3 , а щільність метеороїдів з масою понад 10^{-2} г становить $0,5 \text{ г/см}^3$, і використовуються моделі потоку, згадані вище, то для менших метеороїдів потік фактично нижчий.

Швидкість метеороїдів. Метеороїди падають на Місяць з майже максимальною швидкістю, тому що Місяць фактично не має атмосфери. З огляду на це, метеороїди на шляху до поверхні Місяця не згорають і не уповільнюються, як це відбувається на Землі.

Швидкість удару метеороїдів може змінюватись від $2,44 \text{ км/с}$, (космічна швидкість Місяця), до 72 км/с (космічна швидкість Сонця) на 1 астрономічну одиницю плюс швидкість системи Земля-Місяць.

Розподіл швидкостей метеороїдів досягає пікових значень між 15 та 20 км/с та має ще один невеликий пік близько 60 км/с .

Середня швидкість падіння місячних метеороїдів становить 20 км/с . Ця швидкість використовується при розгляді впливу удару на місячні структури.

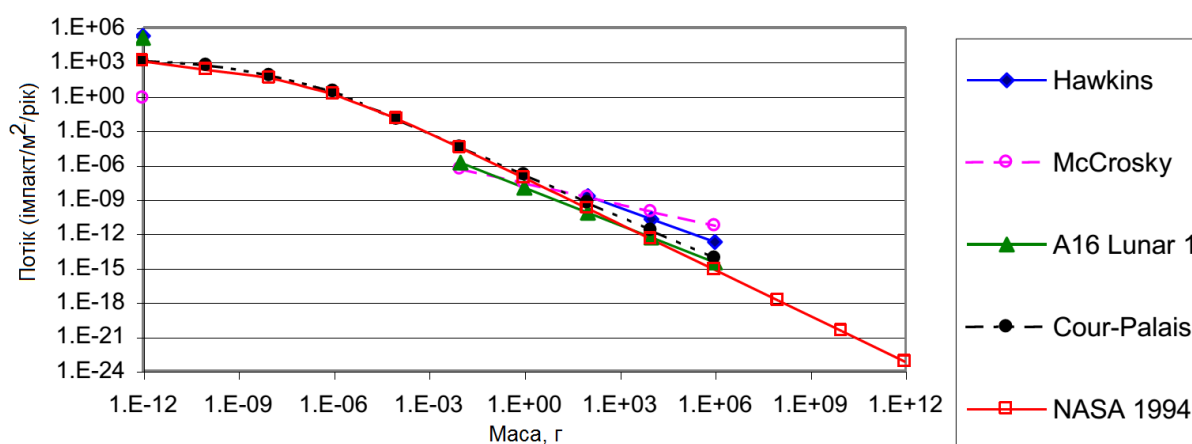


Рис. 2.22. Діаграми потоку місячних метеороїдів за даними: *Hawkins* дані спостереження *Hawkins* (NASA, 1972 р.); *McCrosky* – фотографічна фіксація *McCrosky* (NASA, 1972 р.); *A16 Lunar 1* – дані місячного кратера (NASA, 1972 р.); *Cour-Palais* - фотографії та радар із землі, пряме вимірювання поблизу землі (1969 р.); *NASA 1994* – модель NASA на основі даних з кратерів (1994 р.)

Питома вага. Метеороїди з кометних джерел мають меншу щільність, ніж астероїдні метеороїди та орбітальні уламки.

Вони складаються з пилу та замороженого газу, який відривається від комети, коли вона наближається до Сонця, та розсіюється гравітаційними силами планет. Щільність цих частинок оцінюється від 0,16 до 4 г/см³ та зазвичай приймається рівною в середньому 0,5 г/см³.

Більш дрібні частинки можуть мати більшу щільність: 2 г/см³ для часток масою менше 10⁻⁶ г та 1 г/см³ для частинок масою від 10⁻⁶ до 10⁻² г.

Частинки метеороїдів від астероїдів мають набагато більшу щільність, від 3,5 г/см³ до 7,8 г/см³, залежно від того, чи містять вони камінь або метали, такі як залізо та нікель. Однак ці високощільні метеороїди астероїдного походження рідко стикаються з Місяцем.

Форма метеороїдів. Форма місячних метеороїдів мало вивчена у літературі. Більшість експериментів на надшвидкості проводиться зі сферами, хоча це робиться для відтворення та порівняння даних випробувань, а не для моделювання реальних форм метеороїду або орбітального сміття.

Мікрометеороїди не є ідеальними сферами, але найчастіше мають приблизно сферичну та неправильну форму. Несферичні частки часто завдають більших руйнувань, ніж сфери, що очевидно в експериментах з гіпершвидкостями з використанням циліндрів. Отже, через форму метеороїдів мінімальна товщина захисних елементів модуля для сферичної

частки не обов'язково буде достатньою, і підвищений ризик, хоча й чітко не визначений, слід враховувати при проектуванні.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

За наведеними даними щодо умов навколишнього середовища на Місяці визначено їхній вплив на конструкцію місячного житлового.

В табл. 2.12 наведено резюме за різними факторами місячного середовища, їх коротка характеристика, а також їхній вплив на проектування модуля.

Таблиця 2.12 - Фактори місячного середовища, їх коротка характеристика, а також їхній вплив на проектування місячного модуля

<i>Фактор місячного середовища</i>	<i>Коротка характеристика</i>	<i>Вплив на проектування модуля</i>
Топологія	Суттєві зміни висоти між різними точками на місячній поверхні. Наявність лавових трубок під поверхнею.	Може знадобитися попередня підготовка майданчика. Використання лавових трубок може створити додатковий захист (наприклад, від радіації)
Склад та властивості місячного ґрунту - реголіту	Шар пухких, неоднорідних поверхневих накопичень, що покривають тверду породу.	Шар реголіту на покритті модуля можуть бути використаний як радіаційний екран та захист від ударів метеороїдів. Необхідно враховувати додаткове навантаження.
Сейсмічна активність	Близько 500 місяцетрусів на рік. Неглибокі місяцетруси за шкалою Ріхтера має магнітуду 5 – 6 балів, глибокі місяцетруси мають магнітуду менше 3.	Розрахунок конструкції модуля на сейсмічні навантаження. Проектування пасивного та активного сейсмічного захисту.

<i>Фактор місячного середовища</i>	<i>Коротка характеристика</i>	<i>Вплив на проектування модуля</i>
Гравітація	Середнє значення прискорення вільного падіння на поверхні близько 1.622 м/с^2 . Маскони призводять до локального збільшення сили тяжіння, незважаючи на характеристики топології.	Менша сила гравітації дозволяє будувати витягнуті вгору конструкції. Система розгортання модуля повинна бути розроблена для подолання впливу гравітації. При проектуванні багатопверхових модулів необхідне забезпечення коректної роботи інженерних систем (водопроводів, каналізації тощо). Гравітація буде мати великий вплив на рух астронавтів.
Магнітне поле	Максимальна загальною силою магнітного поля на поверхні Місяця близько 100 нТ див. Виявлені міні-магнітосфери	Відсутність магнітного поля обумовлює необхідність системи радіаційного захисту.
Місячна атмосфера	Щільної газової оболонки немає. Концентрація іонів газу в 1 см^3 становить $10^4 - 10^5$.	Необхідний захист від падіння метеоритів та космічного випромінювання.
Місячний пил	Липка субстанція, здатна накопичувати електричний заряд. Прилипає до поверхонь і викликає деградацію скафандрів і обладнання.	Потрібні стратегії запобігання потраплянню в місячний модуль та видаленню місячного пилу, захисту екіпажу при роботі на поверхні.
Освітлення	Частини кратерів на полюсах Місяця ніколи	Необхідні системи штучного або

<i>Фактор місячного середовища</i>	<i>Коротка характеристика</i>	<i>Вплив на проектування модуля</i>
	не освітлюються, в той час як деякі прилеглі ділянки поверхні можуть бути освітлені до 89% на рік.	гібридного регульованого освітлення.
Температура	Екстремальні температурні умови (від -173°C на неосвітленій стороні до +127°C на освітленій).	Необхідні системи теплового захисту та активного термоконтроля.
Радіація	Середня еквівалентну дозу випромінювання на поверхні Місяця 1369 мкЗв/день.	Гранична межа 1 Зв протягом всього терміну праці. Максимальну дозу опромінення 0,5 Зв/рік. Необхідний захист екіпажу від радіації. Застосування стійких до радіації матеріалів.
Метеоїди	Середня швидкість падіння місячних метеороїдів становить 20 км/с. Питома вага від 0,16 до 4 г/см ³ (в середньому 0,5 г/см ³).	Необхідність динамічного розрахунку на ударні навантаження.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 2

1. <http://cyclowiki.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:MoonTopoGeoidUSGS-ru.jpg>
2. [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Lunar_highlands_\(AS16-M-3007\).jpg](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Lunar_highlands_(AS16-M-3007).jpg).
3. <https://s.expeducation.ru/pdf/2013/11-2/4325.pdf>.
4. <https://naukarus.com/fiziko-mehanicheskie-svoystva-lunnogo-grunta-obzor>
5. http://www.geokhi.ru/Lists/List1/Attachments/6036/%D0%A1%D0%BB%D1%8E%D1%82%D0%B0_2014_C%D0%B2%D0%BE%D0%B9%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0_%D0%BB%D1%83%D0%BD%D0%BD%D0%BE

%D0%B3%D0%BE_%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%BD%D1%82%D0%B0.pdf.

6. <https://naukarus.com/fiziko-mehanicheskie-svoystva-lunnogo-grunta-obzor>.

7. <https://expeducation.ru/ru/article/view?id=4325>.

8. <http://www.planetology.ru/florensky/documents/2.2.60.pdf?language=english>.

9. Lunar base habitat designs [microform] : characterizing the environment, and selecting habitat designs for future trade-offs / Gani B. Ganapathi, Joseph Ferrall, P.K. Seshan. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19940023431>

10. Design of a Deployable Structure for a Lunar Greenhouse Module. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A91020a79-bb59-46ef-aafe-2878eed822e3>.

11. https://lira-soft.com/download/present/SSBS-2009-06_p27-31_Dzhinchvelashvili.pdf.

12. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Маскoн>.

13. Wieczorek, M. A.; Weiss, B. P.; Stewart, S. T. (2012). An Impactor Origin for Lunar Magnetic Anomalies. *Science*, 335(6073), 1212–1215. doi:10.1126/science.1214773.

14. <http://astrolab.ru/cgi-bin/manager.cgi-id=14&num=643.html>.

15. https://www.researchgate.net/publication/273140226_Technical_Aspects_of_Meteoroid_Impacts_on_a_Lunar_Structure.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Сформульовано технічні вимоги до надійності, безпеки, міцності, температурної стійкості конструкцій, які враховуватимуть екстремальні умови функціонування у Місячному середовищі, а також основні положення щодо проектування високофункціональних ресурсоефективних житлових модулів Місячної бази.

2. Запропоновано архітектурні концепції житлового та виробничого середовища та інфраструктури Місячної бази, що призначена для захисту космонавтів від екстремальних перепадів температур, ударів метеоритів, радіації та космічного вакууму. Концепція представляє функціональне зонування території, розташування, плани, розрізи, фасади та тривимірну візуалізацію будівель бази, схему інфраструктури та транспортного забезпечення, логістику виробництва матеріалів з локальної сировини.

Наукове видання

Савицький Микола
Шехоркіна Світлана
Бордун Марина
Данішевський Владислав
Нікіфорова Тетяна
Євсєєва Галина
Шатов Сергій
Адегов Олександр
Воробйов Віктор
Зінкевич Оксана
Ляховецька-Токарева Марина
Конопляник Олександр
Коваль Олена

Титюк Анатолій
Савицький Олександр
Шевченко Тетяна
Юрченко Євген
Гайдар Анастасія
Бондаренко Ольга
Лясота Олександр
Марченко Ігор
Савицький Андрій
Іншаков Валерій
Куліченко Наталія
Страшко Віталій

АРХІТЕКТУРНО-КОНСТРУКТИВНІ ТА ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ЖИТЛОВИХ МОДУЛІВ МІСЯЧНОЇ БАЗИ. ТОМ 1

Колективна монографія

*За загальною редакцією доктора технічних наук, професора
Миколи Савицького*

Редактори: Савицький М., Бордун М., Шехоркіна С.

Підп. до друку 28.12.2021, відп. до рішення Вченої ради ДВНЗ ПДАБА (Протокол № 7 від 28 грудня 2021 р.). Формат А4. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 14,9. Наклад 300 прим.
Зам. № 4876

Віддруковано ФОП Удовиченко О.М.
49080, м. Дніпро, вул. Донецьке Шосе, 15 кв.531. Тел.785-22-31
Свідцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного
реєстру ДК №3660 від 28.12.2009