

АНОТАЦІЯ

Сурков Є.С. Мінералогічне картування поверхні Місяця за даними спектрофотометра M³ космічного апарату Chandrayaan-1. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія (Галузь знань 10 – Природничі науки). – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2022.

Дисертація присвячена спектрофотометричним дослідженням обраних ділянок поверхні Місяця за даними картуючого спектрометра M³, встановленого на борту космічного апарату Chandrayaan-1. Спектрофотометрія – метод дистанційного зондування поверхонь планет та малих тіл Сонячної Системи, який базується на вимірюванні та подальшій інтерпретації спектрів дифузного відбиття, які несуть у собі інформацію про хіміко-мінералогічний склад та структуру реголіту досліджуваної поверхні.

Надійні спектрофотометричні дослідження Місяця стали можливі після ретельних вимірювань спектра Сонця і суттєво розширили свої можливості після встановлення спектрофотометричних приладів на бортах орбітальних телескопів та штучних супутників Місяця поза атмосферою Землі. На сьогодні даний тип досліджень є одним із найбільш поширених та успішних напрямків дистанційного зондування місячної поверхні та поверхонь інших безатмосферних тіл Сонячної системи. По-перше, після початку застосування ПЗЗ-матриць та успіхів у технологіях напівпровідникових детекторів електромагнітного випромінювання ІЧ діапазону цей тип досліджень є технічно відносно простим та надійним. Іншим фактором є його відносно висока інформативність та порівняно нескладна загальна інтерпретація.

За допомогою спектрофотометричних досліджень було встановлено наявність та вміст у реголіті певних хімічних сполук, хромофорних оксидів FeO та TiO₂, відновленого заліза, концентрацію ізотопу ³He, кількісно оцінено ступінь переробки поверхневого шару реголіту космічними чинниками (космічне вивітрювання). Картування розподілу вмісту хімічних компонентів та певних оптичних параметрів по майже усій поверхні Місяця за спектральними даними детекторів, встановлених на різних космічних апаратах від штучного супутника Місяця, апарату CLEMENTINE, до орбітального телескопу Габбла, надало підґрунтя для стрімкого розвитку уявлень про хіміко – мінералогічний склад та структуру поверхні Місяця, фізичні процеси еволюції поверхні під дією космічних чинників, тощо.

Перші спроби залучення спектрофотометричних методів до вирішення питання визначення та картування мінералогічного різноманіття поверхні Місяця були проведені майже з самого початку вимірювання спектрів дифузного відбиття. Так, було отримано важливу інформацію про основні мінерали, присутні на Місяці, та про їх загальний неоднорідний розподіл по поверхні. Проте, на сьогодні кількісні методи дистанційного зондування мінералогії суттєво відстають від визначення вмісту хімічних сполук. Основні спектрофотометричні параметри (наприклад, показники кольору) не показують надійної кореляції із вмістом певних мінералів. Що говорить про суттєву недостатність спектральної інформації, яку надають детектори із декількома широкими спектральними смугами, з одного боку, та про відсутність надійних моделей формування спектрів дифузного відбиття поверхнею складної структури, утворену певним набором різних мінералів.

Дані картуючого спектрометра Moon Mineralogy Mapper (M³), розробленого у NASA та встановленого на борту космічного апарату Індійської організації космічних досліджень (ISRO), на сьогодні має найбільш

широкий спектральний діапазон та найкращу спектральну роздільну здатність. Цей прилад працює поза атмосферою Землі, що в цілому робить його дані найбільш перспективними з точки зору визначення та детального картування мінералогічного складу реголіту Місяця.

Для розширення можливостей використання даних M³ автором цієї роботи було запропоновано метод додаткової обробки гіперспектральних даних. Із використанням зазначеного методу було проведено обробку спектральних даних для обраних ділянок поверхні Місяця: північно-західної частини Плато Аристарх, південної частини Моря Пару разом із розташованим неподалік районом кратеру Гігін та північної частини Моря Спокою. Дані ділянки було обрано з міркувань імовірного мінералогічного різноманіття. Окрім того, розташовані на цих ділянках утворення (наприклад, ІМР у кратері Гігін, комплекс кратера та борозни Гігін, долина Таурис-Літров із місцем посадки КА Аполлон-17), які також було використано в якості об'єктів вивчення, знаходяться у центрі уваги досліджень місячної поверхні.

Задля встановлення зв'язку між спектральними даними та хіміко-мінералогічним складом поверхні Місяця у роботі були використані статистичні методи, моделі розсіювання світла реголітоподібними середовищами з моделями нелінійного спектрального змішування та методи кластерного аналізу даних.

У *першому розділі* було проведено огляд сучасної літератури, присвяченої сучасним науковим даним про мінералогічний склад місячного реголіту та існуючим спектрофотометричним методам дистанційного прогнозування мінералогічного складу за даними супутникових детекторів у видимому та ближньому інфрачервоному спектральному діапазоні (від 0.5 до 3 мкм).

Наведено фізичні механізми формування основних смуг поглинання як потенційних діагностичних ознак наявності певного мінералу для основних типів мінералів поверхні Місяця. Проведено аналіз лабораторних спектрів дифузного відбиття основних груп мінералів, які входять до складу реголіту Місяця. Подано опис одновимірної моделі нелінійного спектрального змішування, який було використано для фізичного обґрунтування залежності нахилу дифузних спектрів відбиття реголіту Місяця від вмісту TiO_2 .

У останньому пункті на прикладі ключових робіт продемонстровано основні сучасні методи прогнозування мінералогічного складу реголіту Місяця та визначено їх основні недоліки. На основі проведеного аналізу було висунуто ідею розробки підходу до дистанційного прогнозування мінералогічного складу поверхні Місяця, який би спирався на надійні спектрофотометричні параметри, отримані за даними M^3 , та їхній зрозумілий, фізично обґрунтований та лабораторно підтверджений зв'язок із мінералогією.

У *другому розділі* подано загальні технічні відомості про застосовані до наявних даних детектору M^3 калібрування, які важливі для подальшої роботи із цими даними. Надано детальний опис запропонованого автором дисертації методу обробки даних картуючого спектрометру M^3 та необхідні технічні деталі, які стосуються отримання спектральних параметрів, використаних у цій роботі для прогнозування мінералогічного складу. Обговорено якість обробки, можливі недоліки та артефакти.

У *третьому розділі* описуються результати спектрофотометричних досліджень обраних ділянок поверхні Місяця за додатково обробленими даними M^3 . Обговорено зв'язок отриманих спектральних параметрів із особливостями складу та структури реголіту. Обґрунтовано мінералогічну інтерпретацію для кола спостережуваних ефектів. Створені карти мінералогічних типів поверхні, пірокластичних покладів, та вмісту окремих

мінералів і проаналізовано, як узгоджуються отримані результати із даними сучасних геологічних досліджень. Основними науковими результатами проведеного дослідження є:

- 1) розробка двоетапного методу фільтрації гіперспектральних даних скануючого спектрофотометру M^3 , застосування якого дозволило отримати принципово важливі для мінералогічної інтерпретації спектрально-оптичні параметри із високою просторовою роздільною здатністю;
- 2) завдяки залученню кластерного аналізу дістала подальшого розвитку техніка визначення та уточнення мінералогічного складу за діаграмою положень мінімумів смуг поглинання поблизу одного та двох мікрометрів (діаграма Адамса). Такий підхід дозволив уточнити контури покладів пірокластичного матеріалу на північно-західній частині Плато Аристарх та у районі DMD на півдні Моря Пару;
- 3) побудовану за кластеризованою діаграмою Адамса карту класів було застосовано для визначення та інтерпретації низькоальбедних покладів навколо кратера Гігін як пірокластичних ;
- 4) апробація запропонованого у дисертації методу обробки даних M^3 для отримання надійної спектральної інформації із просторовою роздільною здатністю приладу; таким чином був проведений опис оптичних властивостей та особливостей мінералогічного складу нерегулярних морських утворень (IMR) на внутрішній частині кратера Гігін. Особливості форми контурів та положення мінімуму смуги поглинання біля 2 мкм цих утворень вказують на присутність у реголіті Mg-шпінелей, які на поверхні Місяця, ймовірно, утворюються внаслідок вулканічних процесів. Аналіз спектрального нахилу даних геологічних формацій показав оптичну незрілість їхньої поверхні, що є непрямим

свідченням молодого віку утворень (після закінчення основного періоду вулканічної активності, прийнятого на сьогодні);

- 5) із залученням моделі нелінійного спектрального змішування надано фізичну інтерпретацію статистичного зв'язку показника кольору $C(315 \text{ нм}/450 \text{ нм})$ із вмістом діоксиду титану;
- 6) вперше вироблено підхід до прямої оцінки вмісту ільменіту за глибиною смуги поглинання біля 1.5 мкм. Дану методику було застосовано до спектрів M^3 , отриманих для місяця посадки Аполлону - 17, що дозволило провести порівняння дистанційно визначеної кількості ільменіту з лабораторними даними зразків, які було зібрано та доставлено на Землю під час місії;
- 7) проведено картування вмісту ільменіту у морських базальтах на межі Морів Ясності та Спокою. Загалом, ільменіт у даному регіоні широко варіюється та складає від 1 до близько 20% маси реголіту;
- 8) побудовано карту розподілу різниці загального вмісту TiO_2 та вмісту TiO_2 , що знаходиться у складі кристалічної фракції ільменіту. Ця різниця несе у собі інформацію про розподіл TiO_2 між різними оксидними мінералами (ульвошпінель, рутил, ільменіт, тощо), а також аморфною фракцією реголіту – аглютинатів.

В цілому, отримані результати добре узгоджуються з загальноприйнятими сучасними уявленнями про мінералогічний склад поверхні Місяця та формують ряд нових уточнюючих положень щодо спектрально-оптичних характеристик та мінералогічного складу реголіту, важливих для подальших досліджень формування вулканічного комплексу кратера та борозни Гігін, віку та механізму утворення нерегулярних морських утворень (IMP), процесів плину, застигання та подальшої еволюції базальтів Моря Спокою. Розроблені методи дистанційного зондування можуть бути

застосовані до спектральних даних інших локацій на Місяці з метою встановлення, або уточнення мінералогічного складу та при побудові глобальних карт розподілу спектрально-оптичних параметрів та мінералогічного різноманіття для наукових потреб, при плануванні майбутніх космічних місій, а також для оцінки ресурсного потенціалу Місяця.

Ключові слова: дистанційне зондування, реголіт Місяця, перетворення Фур'є, множник збіжності, діаграма Адамса, кластерний аналіз, ільменіт.