

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів

дисертації Суркова Єгора Сергійовича

**«Мінералогічне картування поверхні Місяця за даними
спектрофотометру M³ космічного апарату Chandrayaan-1»**

на здобуття ступеня доктора філософії

за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія

з галузі знань 10 – Природничі науки

1. Обґрунтування вибору теми дослідження та її зв'язок із планами наукових робіт університету.

Спектрофотометрія поверхні Місяця та інших безатмосферних тіл Сонячної системи з борту космічних апаратів (КА) дає можливість вивчення складу та структури місячної поверхні за умов, які неможливі для телескопічних досліджень (вища просторова роздільна здатність, ширший спектральний діапазон, різноманітні умови освітлення/спостереження, відсутність завад, пов'язаних з атмосферою Землі). З метою досягнення більшої точності даних за якісно кращих умов провідними світовими космічними агенціями було створено низку космічних місій (ESA SMART-1, JAXA SELENE, NASA LRO, China NSA Chang'E-1, ISRO Chandrayaan-1), в ході яких було накопичено величезну кількість даних у різних діапазонах електромагнітного випромінювання.

При просторовій роздільній здатності приблизно 140 метрів на піксель, та 85 вузьких спектральних смугах, що охоплюють діапазон від 0.54 до 3.0 μm , де розташовані діагностичні смуги поглинання основних породотвірних мінералів Місяця, та охопленням понад 95% поверхні Місяця, дані скануючого спектрометра M³, встановленого на борту КА Chandrayaan – 1, на сьогодні є

найбільш перспективними при вивченні та детальному картуванні хіміко-мінералогічного складу. На відміну від інших, широко розповсюджених на сьогодні методів встановлення зв'язку між спектрально-оптичними параметрами та складом, що спираються на використання параметрів, визначених за альbedo у обмеженій кількості довжин хвиль (наприклад, показники кольору, відома формула Люсі, тощо), гіперспектральні зображення M³ дають змогу отримати для поверхні Місяця такі нові параметри спектральних смуг як глибина, положення, інтегральна глибина, ширина на пів-глибині, асиметрія та інші. Це відкриває нові перспективи для дистанційного прогнозування та детального картування мінералогічного складу поверхні Місяця та можливостей пошуку нових компонентів складу поверхні, що на сьогодні ще не були визначені через обмежену розповсюдженість та/або невеликий вміст у реголіті. Однак, через значні спотворення даних технічними факторами точне визначення та якісне картування параметрів смуг поглинання майже неможливе. Дані, отримані з M³, є унікальними, тож задача пошуку методу ефективної обробки масиву даних для надійного визначення спектральних властивостей є актуальною на сьогодні. Вирішення цієї задачі дає можливість отримати карти розподілів спектральних параметрів, вдосконалити існуючі і розробити нові методи якісного та кількісного прогнозування мінералогічного складу поверхні Місяця за додатково обробленими даними M³.

Метою дисертаційної роботи є визначення та побудова карт розподілів спектральних параметрів з використанням оброблених даних приладу M³, встановлення зв'язку отриманих спектральних параметрів із мінералогічним складом реголіту Місяця, вдосконалення та розробка методів якісного та кількісного прогнозування мінералогічного складу. Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні **завдання**:

1) проаналізувати вплив наявних артефактів даних скануючого спектрометра M^3 на визначення параметрів смуг поглинання у спектрах відбиття;

2) розробити методи та відповідне програмне забезпечення (далі – ПЗ) для усунення наявних артефактів;

3) розробити додаткове ПЗ для мінералогічного прогнозування та картування спектральних параметрів для подальшої інтерпретації, кластерного аналізу діаграм Адамса, отриманих за даними детектора M^3 ;

4) провести картування спектральних параметрів для обраних ділянок поверхні Місяця, встановити зв'язок між оптичними та геолого-мінералогічними даними. Провести мінералогічну інтерпретацію отриманих спектральних параметрів;

5) розробити метод кількісного аналізу мінералогічного складу поверхні Місяця.

Об'єктом дослідження дисертаційної роботи є поверхня Місяця.

Предметом дослідження є спектральні характеристики, оптичні властивості та хіміко – мінералогічний склад реголіту Місяця.

Методи дослідження. Для зменшення вкладу основного артефакту даних M^3 було використано послідовно згортку спектру з гаусовим вікном та режекційний частотний фільтр на базі двовимірного перетворення Фур'є, який було додатково оснащено множником збіжності, задля запобігання прояву ефекту Гіббса.

При отриманні спектральних параметрів за даними M^3 в якості наближення спектрального континууму застосовувався непараметричний метод, який базується на визначенні опуклої оболонки спектру. Для подальшого спектрального та мінералогічного аналізу для виділення спектральних класів і побудови карт класів було залучено сучасні підходи

кластерного аналізу. Для калібрування залежності інтегральної глибини смуги поглинання біля 1.5 мкм у спектрі Місяця від вмісту ільменіту у реголіті було застосовано лінійну регресію.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі астрономії та космічної інформатики фізичного факультету Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна та є складовою частиною науково-дослідної роботи НДІ астрономії Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна у відповідності з планом науково-дослідних робіт за темою НДР «Визначення хіміко-мінералогічних та структурних характеристик поверхні Місяця для планування і реалізації космічних програм», номер державної реєстрації 0119U002529, 01.01.2019 – 31.12.2021, (здобувач – виконавець).

2. Формулювання наукового завдання, нове вирішення якого отримано в дисертації.

Дисертаційна робота Суркова Є.С. присвячена вирішенню однієї з важливих проблем сучасної спектروفотометрії безатмосферних тіл Сонячної системи, а саме з обробкою гіперспектральних даних космічних апаратів, встановленням зв'язку спектральних даних із складом та структурою реголіту. З метою розв'язання цієї задачі було запропоновано метод додаткової обробки даних детектору M^3 , застосування якого дозволило проводити визначення та якісне картування спектральних параметрів, розроблено нові підходи до ідентифікації та картування мінералогічного складу поверхні Місяця, досліджено зв'язок між мінералогічним складом та спектрами дифузного відбиття реголітоподібної поверхні.

3. Наукові положення, розроблені особисто дисертантом, та їх новизна.

Наукова новизна результатів дослідження, отриманих особисто здобувачем, полягає у наступному:

- 1) розроблено двоетапний метод фільтрації гіперспектральних даних скануючого спектрофотометра M^3 , застосування якого дозволило отримати принципово важливі для мінералогічної інтерпретації спектрально-оптичні параметри із високою просторовою роздільною здатністю;
- 2) розроблено метод визначення та картування спектральних класів шляхом кластеризації діаграми Адамса. Даний метод дозволяє картувати спектральні провінції та має чітку мінералогічну інтерпретацію, що дозволяє проводити дослідження якісного мінералогічного складу поверхні Місяця;
- 3) розроблено метод ідентифікації та контурування покладів склоподібного матеріалу утвореного в наслідок вулканізму, ударних процесів, або пірокластичного походження на поверхні Місяця;
- 4) 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;
- 5) вироблено підхід до прямої оцінки вмісту ільменіту за глибиною смуги поглинання біля 1.5 мкм. Даний метод було застосовано до картування вмісту ільменіту у морських базальтах на межі Морів Ясності та Спокою;
- 6) Встановлено наявність відмінностей у загальній кількості вмісту TiO_2 та вмісту TiO_2 , що знаходиться у складі кристалічної фракції ільменіту, для певних ділянок поверхні Місяця. Така різниця свідчить про

неоднорідний розподіл TiO_2 між різними мінералами (ульвошпінель, рутил, ільменіт, тощо), а також продуктами дії різних чинників – титановмісним склом та аглютинатами.

4. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, результатів і висновків дисертації забезпечена коректним застосуванням сучасних методів спектрофотометричних досліджень поверхонь безатмосферних тіл, моделей світлорозсіювання реголітоподібними середовищами, методів математичної статистики та кластерного аналізу, а також ретельним співставленням одержаних результатів із широким колом першоджерел наукової літератури.

5. Рівень теоретичної підготовки здобувача, його особистий внесок у вирішення конкретного наукового завдання. Рівень обізнаності здобувача з результатами наукових досліджень інших учених.

Дисертаном самостійно запропоновано метод додаткової обробки даних детектору M^3 , проведено обробку та картування спектальних параметрів обраних ділянок поверхні Місяця, створено комплекс відповідного програмного забезпечення, проаналізовано отримані результати та сформульовано висновки. Визначення мети та завдань дослідження, застосування сучасних методів спектрофотометрії реголітоподібних поверхонь та аналізу спектральних даних, обговорення та інтерпретація отриманих даних здійснювались спільно з науковим керівником та співавторами наукових публікацій. Здобувач показав високий рівень обізнаності з результатами наукових досліджень інших учених за темою дисертації.

6. Наукове та практичне значення роботи.

Результати мінералогічного картування ділянок поверхні та метод кількісного визначення вмісту ільменіту у реголіті Місяця можуть бути використані для уточнення цілей при плануванні майбутніх програм дослідження Місяця, таких як: (1) проєкт української подвійної місії до Місяця; (2) при проведенні космічних експериментів на навколomisячній орбіті, передбачених концепцією реалізації державної політики України у сфері космічної діяльності на період до 2032 року (Розпорядження Кабінету міністрів України від 20 березня 2011).

7. Використання результатів роботи.

Результати досліджень можуть бути впроваджені в освітні навчальні програми дисциплін «Фізика планет», «Оптика планетних поверхонь», «Космічні дослідження Сонячної системи» та навчальної обчислювальної практики на кафедрі астрономії та космічної інформатики фізичного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна

8. Повнота викладу матеріалів дисертації в публікаціях та особистий внесок здобувача в публікації.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 8 наукових працях, з них 3 статті у періодичних наукових виданнях країн, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку, що входять до міжнародної наукометричної бази SCOPUS, 5 тез доповідей на міжнародних і вітчизняних наукових конференціях.

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати
дисертації:**

*Публікації у періодичних наукових виданнях країн, які входять до
Організації економічного співробітництва та розвитку, що входять до
міжнародної наукометричної бази SCOPUS*

1. Shkuratov Y., Surkov Y., Ivanov M., Korokhin V., Kaydash V., Videen G., Pieters C., & Stankevich D. (2019). Improved Chandrayaan-1 M³ data: A northwest portion of the Aristarchus Plateau and contiguous maria. *Icarus* 321, 34–49. doi: 10.1016/j.icarus.2018.11.002.
Особистий внесок здобувача: розробка нового методу обробки даних детектору М³, розробка алгоритму отримання параметрів смуг поглинання для побудови діаграми Адамса.
2. Surkov, Y., Shkuratov, Y., Kaydash, V., Korokhin, V., & Videen, G. (2020). Lunar ilmenite content as assessed by improved Chandrayaan-1 M³ data. *Icarus* 341, article id: 113661. doi: 10.1016/j.icarus.2020.113661.
Особистий внесок здобувача: розробка вдосконалення методу обробки даних детектору М³, висунення ідеї побудови кривої калібровки за лабораторними даними для дистанційного визначення вмісту ільменіту у реголіті Місяця.
3. Surkov, Y., Shkuratov, Y., Kaydash, V., Velichko, V., Korokhin, V., & Videen, G. (2021). Characterizing pyroclastic deposits of Mare Vaporum with improved Chandrayaan-1 M³ data. *Icarus* 355, article id: 114123. doi: 10.106/j.icarus.2020.114123.

Особистий внесок здобувача: побудова та кластерний аналіз діаграми Адамса за даними M³, візуалізація та аналіз спектральних даних визначених мінералогічних провінцій.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

4. Kaydash, V., Surkov, Y., Shkuratov, Y., & Videen, G. (2018). Mapping parameters of the lunar 1-micron spectral band with improved Chandrayaan-1 M³ data. *49th Lunar and Planetary Science Conference*, Houston, USA, № 2083.
5. Surkov, Y., Kaydash, V., Shkuratov, Y., Korokhin, V., & Videen, G. (2018). Fourier filtration can provide significant improvement of Chandrayaan-1 M³ lunar data. *Atmosphereless Solar System bodies in the space exploration era*, Kharkiv, Ukraine.
(<http://www.astron.kharkov.ua/conference/ssb/18/abstr/Surkov.pdf>)
6. Shkuratov, Y., Kaydash, V., Korokhin, V., Opanasenko, N., Surkov, Y., Velichko, S., & Videen, G. (2018). Fascinating novelties of lunar optics. *Atmosphereless Solar System bodies in the space exploration era*, Kharkiv, Ukraine.
(<http://www.astron.kharkov.ua/conference/ssb/18/abstr/Shkuratov.pdf>)
7. Surkov, Y., Shkuratov, Y., Kaydash, V., Korokhin, V., & Videen, G. (2019). Mapping the 1.5 μm ilmenite spectral feature with Chandrayaan-1 M³ data. *50th Lunar and Planetary Science Conference*, Houston, USA, № 1026.
8. Surkov, Y., Shkuratov, Y., Kaydash, V., & Videen, G. (2020). Modelling relationship between color ration C(321 nm/415 nm) and TiO₂ content. *51st Lunar and Planetary Science Conference*, Houston, USA, № 1311.

9. Апробація матеріалів дисертації.

Основні результати досліджень були представлені, обговорені і опубліковані в тезах доповідей вітчизняних та міжнародних наукових конференцій: 49th Lunar and Planetary Science Conference (Houston, USA, 2018); Atmosphereless Solar System bodies in the space exploration era (Харків, Україна, 2018); 50th Lunar and Planetary Science Conference (Houston, USA, 2019); 51th Lunar and Planetary Science Conference (Houston, USA, 2020)

10. Оцінка мови та стилю дисертації.

Матеріал дисертації викладено в логічній послідовності та доступно для сприйняття. Дисертація написана науковим стилем мовлення, структура дисертації відповідає алгоритму здійсненого автором дослідження. Зміст, структура, оформлення дисертації та кількість публікацій відповідають вимогам відповідно постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, зі змінами, внесеними згідно з постановою Кабінету Міністрів України від 21.03.2022 року № 341).

11. Відповідність змісту дисертації спеціальності з відповідної галузі знань, з якої вона подається до захисту.

За своїм фаховим спрямуванням, науковою новизною і практичною значимістю дисертаційна робота Суркова Є.С. відповідає спеціальності 104 – Фізика та астрономія. Здобувачем повністю виконано освітню та наукову складову освітньо-наукового рівня вищої освіти.

12. Рекомендація дисертації до захисту.

Враховуючи високий рівень виконаних досліджень, а також актуальність теми роботи, наукову новизну результатів та їх наукове і практичне значення, робота Суркова Єгора Сергійовича «Мінералогічне картування поверхні Місяця за даними спектрофотометру M³ космічного апарату Chandrayaan-1» рекомендується до захисту в спеціалізованій вченій раді для здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія з галузі знань 10 – Природничі науки.

Головуючий,
професор кафедри астрономії та
космічної інформатики
Харківського національного
університету імені В. Н. Каразіна,
д.ф.-м.н., проф.



Василь ШЕВЧЕНКО

Секретар, к.ф.-м.н.
Доцент кафедри астрономії та
космічної інформатики
Харківського національного
університету імені В. Н. Каразіна,
к.ф.-м.н.



Іван СЛЮСАРЕВ